

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Diciembre 2015 InvestigacionyCiencia.es
CAMBIO CLIMÁTICO
Ayuda para los bosques amenazados
EVOLUCIÓN
La simetría de los equinodermos
ASTRONOMÍA
Un océano subterráneo en Encélado
BENEFICIOS DEL SUEÑO
Cómo influye en los sistemas nervioso, inmunitario y endocrino
INFORME SPECIAL
ESTADO DE LA CIENCIA GLOBAL
La gran ciencia a examen. Ciencia aplicada a la lucha contra la pobreza y el crimen
9 770210 136004 00471
6,90 EUROS
INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
BENEFICIOS DEL SUEÑO | BOSQUES Y CAMBIO CLIMÁTICO | AGUA EN ENCÉLADO
DICIEMBRE 2015 N.º 471



INVESTIGACION
CIENCIA
SCIENTIFIC AMERICAN



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Olas gigantes en el Ártico
A la caza de exoplanetas gigantes
La enseñanza de las ciencias en el siglo XXI
LA ESPECIE QUE CONQUISTÓ EL PLANETA
¿Cuáles fueron las claves de nuestro éxito evolutivo?

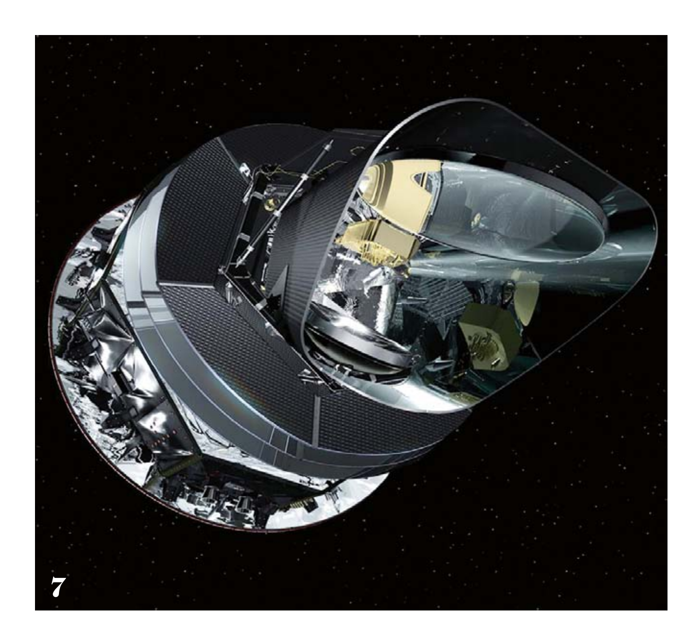


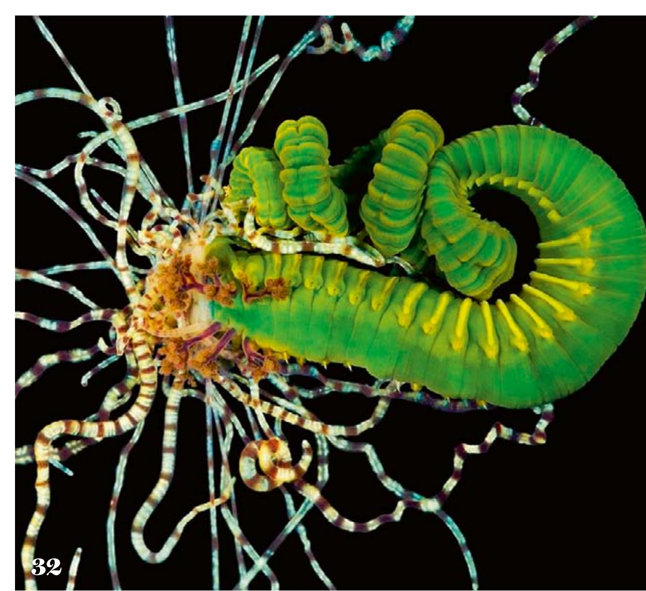
NEUROCIENCIA
Ciegos con visión inconsciente
ASTRONOMIA
Los neutrinos revelan fenómenos insondables
POTENTES



NASA/JPL/SSI/EMILY LAKDAWALLA; *SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*

ARTÍCULOS


7


32


36

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

El sueño no desempeña una única función, sino que mejora varios aspectos de nuestra salud física y mental, según demuestran los estudios recientes. Diferentes etapas del sueño refuerzan distintos tipos de memoria, mientras que la privación del sueño aumenta las probabilidades de ganar peso, contraer infecciones y sufrir depresión. Fotografía de Plamen Petkov.



redaccion@investigacionyciencia.es



Agosto y octubre 2015

POSITRONES Y LUZ EXTRAGALÁCTICA

En el artículo «Toda la luz del universo» [por A. Domínguez, J. R. Primack y T. E. Bell; Investigación y Ciencia, agosto de 2015] se explica cómo los rayos gamma emitidos por blázares distantes son absorbidos por la luz de fondo extragaláctica (EBL, por sus siglas en inglés). En dicho proceso de absorción, los fotones gamma producen pares electrón-positrón.

¿Podrían esos procesos de producción de pares explicar el exceso de positrones detectado hace poco por el Espectrómetro Magnético Alpha (AMS), cuyo posible origen se ha asociado con la desintegración de partículas de materia oscura o con la emisión de púlsares? [*véase* «¿Púlsares o materia oscura?», por M. Aguilar; Investigación y Ciencia, noviembre de 2014]. En el mismo sentido, ¿se ha considerado la posibilidad de utilizar el detector AMS para medir la EBL?

Juan Torras Suriol
Tarrasa, Barcelona

Responde Domínguez: *Es una idea interesante, pero no creo que el origen de los positrones detectados por AMS esté relacionado con la EBL. El proceso de atenuación de los fotones gamma extragalácticos es significativo debido a las enormes distancias recorridas por estos, las cuales hacen que la probabilidad de interacción con la EBL, que permea todo el espacio intergaláctico, no resulte despreciable. En cambio, la probabilidad de que dichas interacciones se produzcan a una distancia tal que los positrones generados puedan ser detectados por AMS es prácticamente nula.*

El origen del exceso de positrones observado por AMS ha de ser necesariamente local; es decir, galáctico. Ello se debe a que el recorrido medio de los positrones es pequeño, ya que se desintegran al interaccionar con la materia. Por tanto, no es posible que la atenuación gamma produzca la cantidad necesaria de positrones a la distancia adecuada para generar el exceso detectado por AMS, ni siquiera una parte importante de este.

Responde Aguilar: *Por desgracia, la física de blázares no se conoce con suficiente detalle. No tengo conocimiento de que se haya calculado el flujo de electrones y positrones, en función de la energía, generados por la interacción entre los fotones de los blázares y los de la EBL, ni tampoco la dependencia con la energía de la fracción positrón/electrón para valores superiores al gigaelectronvoltio (GeV).*

En principio, el instrumento AMS no está diseñado para medir fotones extragalácticos. Su prioridad es el estudio de la radiación cósmica dotada de carga eléctrica hasta energías del orden del teraelectronvoltio (TeV). AMS puede medir fotones con energías de ese orden, pero —de momento— con serias limitaciones estadísticas.

LA BELLA DURMIENTE

Con respecto al artículo «El problema de la bella durmiente» [por A. Pérez Carballo; Investigación y Ciencia, octubre de 2015], me gustaría comentar lo que sigue.

Una vez me despertasen en el laboratorio, no sabría si la moneda ha caído o caerá cara o cruz, y tampoco si es lunes o es martes. Sí sabría que hay tres sucesos posibles: 1) cara y lunes, 2) cruz y lunes y 3) cruz y martes, por lo que intentaría calcular la probabilidad de cada uno de ellos. Si asigno la misma a los tres, la probabilidad del evento «cara» sería de 1/3 (correspondiente al primer suceso).

Sin embargo, también podría razonar del siguiente modo: «No sé si es lunes o martes, pero lo que sí sé es que es o bien lunes, o bien martes. Si es lunes, la probabilidad del suceso 3) es 0. Si es martes, las probabilidades de 1) y 2) son 0». Por tanto —y como no cabe duda de que hoy es o bien lunes, o bien martes—, no podría asignar a los tres sucesos probabilidades iguales hoy. En otras palabras, no podría considerar los tres sucesos como pertenecientes a un mismo universo de eventos, por lo que no podría asignarles probabilidades de la manera anterior. Así pues, deduciría que la probabilidad del evento «cara» es 1/2. Es decir, el problema está mal planteado, puesto que se pregunta por algo inexistente.

Antonio del Campo
San Sebastián

Responde Pérez Carballo: *El problema no se plantea como uno sobre las probabilidades objetivas de ciertos eventos, sino sobre niveles de creencia. Al despertarnos, tiene poco sentido que nos preguntemos sobre la probabilidad objetiva de que sea lunes, ya que o bien es lunes, o bien es martes. Pero, si hemos perdido la noción del tiempo, sí que tiene sentido que nos preguntemos sobre el nivel de creencia que deberíamos asignar a la posibilidad de que sea lunes.*

Supongamos que ayer se lanzó una moneda. No sabemos si cayó cara o cruz. Mañana se lanzará otra. Nos piden que demos nuestro nivel de creencia en los siguientes eventos: 1) cruz ayer, cara mañana; 2) cara ayer, cruz mañana.

Si supiésemos la probabilidad objetiva de cada uno de ellos, podríamos emplear esa información para asignarles un nivel de creencia. El problema, por supuesto, es que desconocemos dicha probabilidad objetiva. Ello se debe a que, si ayer la moneda cayó cara, entonces la probabilidad objetiva del primer evento es 0 y la del segundo, 1/2. Y si cayó cruz, entonces la probabilidad del primer evento es 1/2 y la del segundo, 0. Pero eso no implica que no podamos asignar niveles de creencia (es decir, probabilidades subjetivas) a ambos eventos. En este caso, mi nivel de creencia en cada uno de ellos sería 1/4.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

SALUD

Desarmar a las serpientes

La búsqueda de nuevos antídotos ayudaría a conjurar un peligro ancestral

La medicina moderna es capaz de crear riñones desde cero, detener la propagación de enfermedades contagiosas como el ébola y diagnosticar la causa de la tos a través de un teléfono inteligente. Pero las picaduras de serpiente siguen siendo una asignatura pendiente. Cada año el veneno de estos reptiles mata a casi 200.000 personas y deja cientos de miles de incapacitados o desfigurados, lo que los convierte en el segundo animal más mortífero. Solo el mosquito causa más víctimas, como propagador del protozoo de la malaria.

Hace poco se ha hablado de las serpientes venenosas en los medios de comunicación, al salir a la luz que los principales laboratorios farmacéuticos han cesado el desarrollo de antídotos. El laboratorio francés Sanofi Pasteur acaparó la atención en septiembre, cuando Médicos sin Fronteras denunció que el último lote de FAV-Afrique (el único antídoto de eficacia demostrada para las víctimas de picaduras en el África subsahariana) caducará en junio de 2016. Sanofi, el único fabricante, canceló la producción en 2014 porque no era rentable. Otras empresas del sector ya han dado pasos en esa misma dirección, entre ellas Behringwerke y Wyeth Pharmaceuticals (ahora parte de Pfizer).

La situación es de tal gravedad que Médicos Sin Fronteras califica ahora las picaduras de serpiente como «uno de los problemas urgentes de salud pública más desatendidos». En octubre, docenas de especialistas reunidos en el 18º Congreso Mundial de la Sociedad Internacional de Toxicología en Oxford instaron a la Organización Mundial de la Salud a que recalificara las picaduras de serpiente como una enfermedad tropical desatendida. La mayoría de los casos ocurren en África y en el sudeste de Asia.

El desarrollo de antídotos se quedó estancado en el siglo XIX por la falta de financiación, advierte David Williams, toxicólogo clínico y herpetólogo responsable de la Unidad Australiana de Investigación de Venenos de la Universidad de Melbourne y director ejecutivo de la Iniciativa Global contra las Mordeduras de Serpiente, una organización sin ánimo de lucro. Para aislar los compuestos terapéuticos se inyectan dosis subtóxicas del veneno en animales, se obtienen los anticuerpos generados por la respuesta inmunitaria y, a continuación, estos se purifican. El antisuero debe adaptarse a las toxinas producidas por diversas especies de ofidios de cada región. No existe un antídoto universal.

A pesar de las dificultades, pequeños grupos de investigación en los cinco continentes trabajan discretamente en nuevos remedios, a la espera de que un día caigan del cielo el dinero y el impulso necesarios. El más innovador es un antídoto concebido específicamente para el África subsahariana, el cual podría servir como modelo para la fabricación de compuestos más baratos que tratasen las picaduras de serpientes de otras regiones. Investigadores británicos, costarricenses y españoles han tomado un «antídoto básico» de eficacia demostrada contra tres serpientes y han comenzado a ensayarlo contra las toxinas de otros ofidios. Las proteínas del veneno que no son neutralizadas por el antídoto original se analizan para determinar su toxicidad; solo aquellas que son peligrosas acaban incorporándose a la mezcla inmunizadora, que pretende mejorar la eficacia del futuro antídoto.

Ese cribado selectivo y los análisis reiterados de las proteínas específicas mejorarán la potencia y la especificidad del antídoto respecto a los antisueros tradicionales, que neutralizan sin distinción tanto las proteínas tóxicas como las que no lo son. El grupo también prevé reducir los costes con un método concebido en Costa Rica que reduce sensiblemente las etapas de fabricación. «Queremos fabricar un producto para el África subsahariana que sea más barato o cuyo coste no supere los 35 dólares por vial», aclara Robert Harrison, responsable de la Unidad de Investigación de Venenos Alistair Reid, de la Escuela de Medicina Tropical de Liverpool. El vial del producto de Sanofi cuesta 150 dólares.

Otros animales (y bacterias) podrían proporcionar un antídoto alternativo. Una proteína de zarigüeya descubierta en la década de los noventa del siglo XX protege a los ratones de las toxinas ofídicas que causan hemorragias internas generalizadas. Y esa misma proteína ha neutrali-

LA COBRA INDIA, *Naja naja*, despliega su caperuza como señal de advertencia. Es uno de los ofidios más mortíferos del subcontinente indio.

zado las toxinas hemorrágicas de ofidios venenosos de EE.UU. y Pakistán. Todo apunta a que podría ser un remedio eficaz contra todas las toxinas hemorrágicas de serpiente, asegura Claire Komives, ingeniera química de la Universidad estatal de San José. Komives ya ha demostrado que es posible fabricarla con bacterias *Escherichia coli*, lo que reduciría el coste del tratamiento hasta unos 10 dólares por dosis. «Estamos intentando sintetizarla con bacterias para abaratar la producción a gran escala.» Para financiar su trabajo, esta investigadora ha recurrido al micromecenazgo a través de Experiment.com.

Grupos de investigación de otros lugares ya se han apartado de la concepción tradicional de los antídotos. Matthew Lewin, director del Centro de Salud del Viajero y del Explorador de la Academia Californiana de Ciencias, ha iniciado un examen sistemático de los medicamentos autorizados por la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos de EE.UU. en busca de compuestos químicos que sirvan como base de una inyección o comprimido que estabilice a las personas atacadas en el campo o, por lo menos, les conceda algo de tiempo para llegar al hospital. «Si dispusieran de un antídoto farmacéutico, lo podrían llevar consigo», afirma Lewin. Muchas muertes sobrevienen porque la víctima no llega a tiempo al hospital o al centro médico para recibir el tratamiento endovenoso.

De modo semejante, Sakthivel Vaiyapuri, farmacólogo investigador en la Universidad de Reading, busca moléculas que neutralicen los efectos del veneno de serpiente. También espera desarrollar un cóctel de inhibidores químicos que se convierta en un antídoto universal.

Los tratamientos modernizados supondrían un paso decisivo para reducir las muertes por picadura de serpiente. Pero, en definitiva, el mejor tratamiento del mundo fracasará si no cuenta con una financiación y distribución adecuadas. Williams advierte que «si los ministerios de sanidad responsables de la salud y del bienestar no priorizan el tratamiento contra las picaduras de serpiente, todo este esfuerzo será en balde».

—*Jeremy Hsu*



SURESH SHARMA, GETTY IMAGES (*cobra*); THOMAS FUCHS (*murciélagos*)



ETOLOGÍA

Cantos seductores de los murciélagos

Cuando cortejan a las parejas, los machos de una especie de quiróptero se turnan para cantar

Cuando la noche cae sobre Nueva Zelanda, los bosques comienzan a resonar con chillidos. Los machos de murciélago colicorto chico (*Mystacina tuberculata*) emiten hasta 100.000 sonidos en una noche —más que ningún otro animal— para seducir a una pareja. Las serenatas tienen lugar desde una percha de canto destinada al solo fin del cortejo. Pero no todos los donjuanes actúan como solistas. Después de pasar tres años estudiando las costumbres de estos mamíferos nocturnos, Cory Toth, de la Universidad de Auckland, ha comprobado que los machos de casi la mitad de las 12 perchas de canto que observó en la Isla del Norte eran escenarios compartidos. «Cuando un macho concluye su interpretación y abandona el lugar, en solo tres segundos lo ocupa otro que prorrumpe a cantar», relata Toth. En total, dos de los cinco machos cantaban cada noche desde la misma percha, unas horas cada uno.

De las perchas colectivas surgen más cantos que de las ocupadas la noche entera por solistas, y eso aumenta las posibilidades de seducir a las hembras que pasen cerca. El ecoetólogo pensó primero que los pretendientes que se turnaban en el escenario debían ser parientes y cooperaban para asegurar el éxito de su acervo génico común. Pero tras comprobar que los machos de tres de las cuatro perchas no guardaban parentesco alguno entre sí o este era lejano, prestó atención a su talla: los que se alternaban eran sensiblemente más grandes que los solistas. Los machos voluminosos invierten más energía en los quehaceres diarios que exige la supervivencia y, por ello, han de economizar fuerzas por la noche turnándose en el canto, explica Toth. De hecho, los análisis de ADN revelaron que el éxito reproductor de los murciélagos de la colonia era similar, ya fueran grandes o pequeños, lo cual parece indicar que el hecho de compartir el escenario ayuda a los primeros a competir con los segundos.

El murciélago colicorto chico es uno de los dos únicos mamíferos terrestres endémicos que quedan en el país (el otro es el murciélago colilargo) y está amenazado. El conocimiento de sus costumbres reproductoras ayudará a mejorar las campañas de conservación.

—*David Godkin*

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Su dinero también tuitea

El nivel de ingresos de los usuarios de Twitter puede predecirse a partir de sus mensajes

Al igual que de sexo, la mayoría de las personas prefiere no hablar de dinero en público. Sin embargo, todos dejamos con regularidad pistas digitales sobre nuestra situación económica... incluso cuando nos expresamos dentro del límite de los 140 caracteres por mensaje que permite Twitter.

Un análisis de 10,8 millones de mensajes redactados por 5000 miembros de la red social ha demostrado que la información contenida en los tuits permite inferir el nivel de ingresos del usuario. Daniel Preoţiuc-Pietro, investigador de la Universidad de Pensilvania especializado en procesamiento del lenguaje natural, y sus colaboradores usaron la profesión declarada por los usuarios para clasificar al 90 por ciento de los sujetos en grupos de ingresos. Después, usaron un sistema de aprendizaje automatizado (uno que analiza los datos que recibe y realiza predicciones a partir de ellos) para identificar las características de los mensajes de cada grupo. Al aplicar el modelo al otro 10 por ciento de los usuarios, el sistema acertó a predecir sus recursos económicos. Los resultados aparecieron publicados este otoño en la revista *PLoS ONE*.

Quienes gozaban de ingresos más altos solían hablar de negocios, política y actividades sin ánimo de lucro. Sin embargo, quienes pertenecían a los segmentos económicos inferiores se atenían sobre todo a asuntos personales (consejos de belleza, por ejemplo) o a sus experiencias. El análisis reveló, además, que es más probable que los tuits de quienes ganan más dinero expresen miedo o ira.

En otros estudios previos con métodos de aprendizaje automatizado, Preoţiuc-Pietro y sus colaboradores lograron predecir el sexo, la edad y la orientación política de los usuarios de Twitter. Pudieron incluso detectar indicios de depresión posparto o trastorno de estrés postraumático. Los investigadores siguen desarrollando su modelo, si bien Preoţiuc-Pietro advierte que el aprendizaje automatizado solo puede llegar hasta donde le permiten los datos a los que tiene acceso. «La gente debería ser consciente de cuánto está revelando acerca de sí misma de forma inadvertida», concluye el investigador.

—Rachel Nuwer

MEDIOAMBIENTE

Recargar los acuíferos

Los hidrólogos experimentan con una técnica agrícola que podría paliar los estragos de la sequía

Los ríos languidecen convertidos en arroyuelos y los embalses antaño rebosantes han quedado reducidos a estanques insignificantes. Los más afectados por la sequía que desde hace cuatro años azota el estado de California son los agricultores del Valle Central, que ven amenazados su modo de vida y su sustento. Sin lluvia que fecunde los campos, los agricultores recurren sin cesar a los acuíferos subterráneos y la sobreexplotación ya se ha cobrado su tributo: los niveles freáticos han descendido drásticamente.

Por suerte, las previsiones meteorológicas auguran para este invierno lluvia a raudales sobre California, casi con seguridad exacerbada por el fenómeno de El Niño. Las redes de evacuación de las aguas pluviales suelen desaguar en el mar, pero ante el fuerte déficit hídrico que ahoga la región, los especialistas en hidrología de la Universidad de California en Davis están experimentado con la reposición de los acuíferos, que consiste en dirigir el agua de las crecidas hacia los campos en barbecho, desde donde se infiltra a través del suelo hasta los acuíferos. El agua de la lluvia absorbida en invierno serviría así como reserva de riego para el verano, cuando los cultivos se hallan en crecimiento, afirma Helen Dahlke, de la mencionada universidad.

EL ANEGAMIENTO CONTROLADO de los campos de cultivo, como el de esta huerta de nogales, podría recargar los acuíferos de California.



Este invierno el equipo de Dahlke anegará durante dos meses huertas de almendros ubicadas en el Valle Central, cerca de Davis, hasta medio metro de profundidad, y utilizará para ello el agua de lluvia canalizada a través de una red de acequias y canales concebida en su día para desviar las avenidas. Para valorar la eficacia de la medida, controlarán el volumen de agua que se incorpora al manto freático a lo largo de dos años. También analizarán la calidad del agua infiltrada y examinarán los árboles para detectar la putrefacción de las raíces, que podría mermar el rendimiento de la cosecha. Si el método funciona, las parcelas de perales, ciruelos y nogales también podrían beneficiarse del anegamiento controlado, según un reciente estudio dirigido por Anthony O'Geen, de la División de Agricultura y Recursos Naturales de la Universidad de California.

Los ensayos anteriores que se realizaron de esa técnica culminaron con éxito. En 2011, Don Cameron, administrador del Terranova Ranch, desvió la crecida del río de los Santos Reyes en el condado de Fresno hacia un centenar de hectáreas de viñedos y otras tierras de labor, inundándolas durante cinco meses. «Parecían arrozales, pero la cosecha de uva fue buena», asegura Cameron. El setenta por ciento del agua se infiltró y almacenó en el manto freático, desde donde se bombeó para regar los campos en la siguiente temporada.

Quedan incógnitas sobre el efecto del agua acumulada en la fisiología de los árboles y qué cantidad de sales y nitratos procedentes de los fertilizantes podría acabar en el agua potable. El coste de la desviación de las aguas pluviales y los aspectos legales, como quién será el propietario del agua captada, también restan pendientes de resolución. Con todo, cerca de 1,5 millones de hectáreas de tierras agrícolas de California podrían servir como aljibes para la recarga de los acuíferos. Pero ante la predicción de los climatólogos de que el déficit pluviométrico del estado continuará por mucho tiempo tras un solo invierno de lluvias torrenciales, cada vez más agricultores están preocupados por el futuro de sus tierras. Cameron afirma: «La sequía aguza el ingenio de la gente».

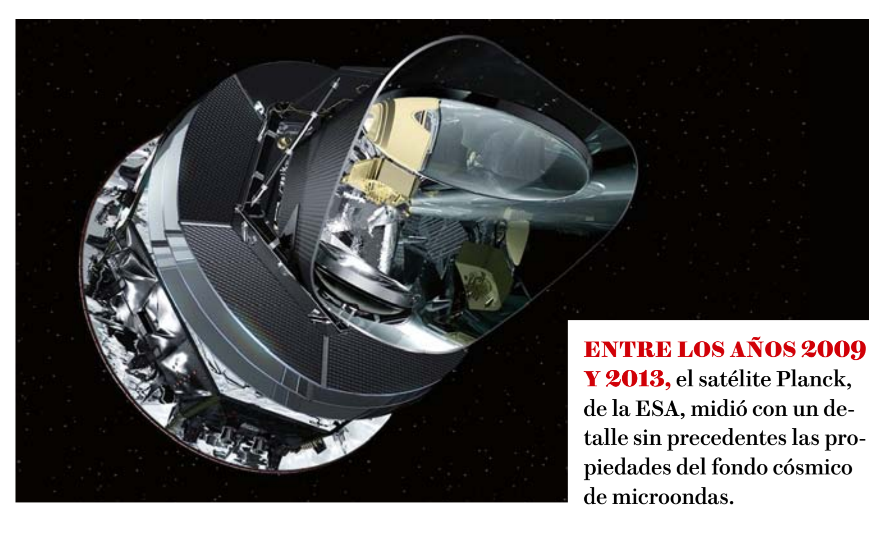
—Jane Braxton Little

THOMAS FUCHS (*Twitter*); CORTESÍA DEL CONSEJO DIRECTIVO DE LA UNIVERSIDAD DE CALIFORNIA (*huerta de nogales*)

COSMOLOGÍA

Neutrinos tras el fondo de microondas

Un estudio detecta de forma indirecta los neutrinos creados instantes después de la gran explosión



ENTRE LOS AÑOS 2009 Y 2013, el satélite Planck, de la ESA, midió con un detalle sin precedentes las propiedades del fondo cósmico de microondas.

La luz más antigua del universo lleva 13.800 millones de años recorriéndolo: emprendió su viaje 380.000 años después de la gran explosión, cuando el cosmos apenas tenía el 0,003 por ciento de su edad actual. Conocida como fondo cósmico de microondas (CMB, por sus siglas en inglés), esta radiación es un coto de caza muy frecuentado por quienes investigan la infancia del universo. Sin embargo, no dice apenas nada de lo que sucedió durante los primeros cientos de miles de años. Ahora, un grupo de físicos de la Universidad de California en Davis cree haber avistado lo que hay detrás de esa luz, al obtener indicios de los neutrinos que fueron emitidos cuando el universo solo contaba un segundo de vida.

Los neutrinos son partículas elementales sin carga eléctrica y con muy poca masa. Dado que apenas interaccionan con la materia, pueden atravesar sin problemas casi cualquier barrera física. Sin embargo, en el caso de los neutrinos primigenios emitidos justo después de la gran explosión, sus ocasionales interacciones con los fotones del CMB habrían alterado ligeramente la temperatura de esta radiación. Ese efecto es el que creen haber detectado los investigadores tras analizar con detalle los datos del fondo de microondas obtenidos por el satélite Planck, de la ESA. Los resultados aparecieron publicados hace unos meses en *Physical Review Letters*.

Aunque la existencia de un fondo cósmico de neutrinos procedentes de la gran explosión fue predicha hace muchos años, esta observación indirecta constituye la prueba más sólida obtenida hasta la fecha. Lawrence M. Krauss, cosmólogo de la Universidad estatal de Arizona que no participó en el estudio, considera que el trabajo abre una nueva ventana para explorar el universo. Además, el estudio permite acotar algunas propiedades de los neutrinos. Los resultados implican que, al contrario de lo que ocurre con otras partículas, los neutrinos no pueden dispersarse unos a otros, ya que en caso de hacerlo habrían dejado en el CMB una impronta distinta de la observada.

El estudio futuro de estos neutrinos primordiales tal vez permita explicar por qué en el universo hay muchas más partículas de materia que de antimateria. Esta asimetría se produjo en el cosmos primitivo, y los expertos creen que los neutrinos podrían tener algo que ver, aunque solo sea por lo misteriosos que resultan. «Dado que sabemos tan poco sobre estas partículas, podemos permitirnos ser más creativos con la física a la que dan lugar», señala Lloyd Knox, coautor del trabajo. Aunque detectar neutrinos de forma directa resulta extremadamente difícil, Knox prevé que las observaciones cosmológicas ayudarán a resolver buena parte de los problemas relacionados con ellos y, en el camino, a entender mejor las propiedades del universo temprano.

—Shannon May

CORTESÍA DE LA AGENCIA ESPACIAL EUROPEA (*satélite Planck*); CASA DE LA CIENCIA (*exposición*)

AGENDA

CONFERENCIAS

2 de diciembre
Laurent Swartz, el matemático que quería cambiar el mundo
Fernando Bombal Gordón, Universidad Complutense de Madrid
Inauguración del XXXVII Seminario de historia de la matemática
Universidad Complutense de Madrid
Madrid
www.mat.ucm.es/shm

4 de diciembre
La búsqueda del agua en el sistema solar. Introducción al programa «seguir el agua» de la NASA
J. F. Moreno Álvarez, CRISA/Airbus
XIII Ciclo de conferencias de Historia y Cultura Aeronáutica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio
Universidad Politécnica de Madrid
Madrid
www.etsiae.upm.es

10 de diciembre
¿Qué sabemos del párkinson?
Ana Martínez Gil, Centro de Investigaciones Biológicas - CSIC
Valdepeñas (Ciudad Real)
www.ciudadciencia.es

10 de diciembre
La química de la guerra y de la paz
Miguel Ángel Sierra, Universidad Complutense de Madrid
Curso «Los avances de la química y su impacto en la sociedad», 5.ª edición
Centro de Química Orgánica Lora Tamayo - CSIC, Madrid
www.losavancesdelaquimica.com

EXPOSICIONES

Memoria
Casa de la Ciencia
Sevilla
www.casadelaciencia.csic.es



OTROS

2 de diciembre - Mesa redonda
¿El conocimiento en venta?
Ciclo «Los derechos sobre la propiedad intelectual en ciencia y tecnología»
Instituto de Historia de la Medicina y de la Ciencia López Piñero
Valencia
www.ihmc.uv-csic.es

MATERIALES

Efectos del dopaje en una superred

Lo mismo que las redes de átomos, las redes de nanopartículas modifican radicalmente sus propiedades cuando algunos de sus componentes son sustituidos por impurezas

DANIEL VANMAEKELBERGH

Durante dos decenios, los investigadores han estado obteniendo materiales sólidos basados en superredes, es decir, conjuntos ordenados de partículas nanométricas. Por analogía con las redes atómicas, podríamos pensar que la incorporación de trazas de ciertas impurezas a estas superredes permite ajustar a medida las propiedades del sólido. Pues parece que así es.

En un artículo publicado en la revista *Nature* el pasado mes de agosto, Matteo Cargnello, de la Universidad de Pensilvania, y sus colaboradores refieren la formación de películas delgadas y superredes bidimensionales de nanocristales de seleniuro de cadmio (CdSe) o seleniuro de plomo (PbSe) que se han «dopado por sustitución» con nanopartículas de oro o de una aleación de oro y plata (se han añadido cantidades controladas de estas con objeto de que ocupen posiciones reticulares en el material receptor, o huésped). Los autores han hallado que este proceso, en efecto, modifica las propiedades de las superredes de un modo que abre el abanico de aplicaciones potenciales.

La inclusión de átomos extraños en la red atómica de un sólido constituye un paso esencial en la fabricación de materiales que se emplean en tecnología de comunicaciones, dispositivos optoelectrónicos y construcción. Un ejemplo clásico es la introducción de arsénico o fósforo en un cristal de silicio; cada átomo dopante forma cuatro enlaces con los átomos vecinos de silicio y dona los electrones de valencia restantes a la banda de conducción. Como consecuencia, el silicio, en vez de aislante eléctrico, se convierte en el semiconductor de uso más extendido. En el caso de las superredes, no se han explorado todavía los efectos que tendrían dopajes por sustitución análogos.

Las superredes de nanopartículas cristalinas surgieron no mucho después de que se descubriera que es posible producir, mediante síntesis química, suspensiones de nanocristales en las cuales todos presentan el mismo tamaño y forma. Las superredes se obtienen a partir de estas suspensiones mediante una cristalización inducida por evaporación del disolvente en condiciones controladas. En el trabajo citado, Cargnello y sus colegas mezclaron una suspensión de CdSe (o PbSe) con nanopartículas de oro en hexano y la depositaron en un líquido inmiscible (etilenglicol), que actuó como sustrato para el crecimiento de la superred. De esta manera, prepararon monocapas, bicapas y películas delgadas de nanocristales como estructuras ordenadas que exhibían una regularidad asombrosa sobre un rango de cientos a miles de celdas unitarias (la unidad más pequeña de una red cristalina).

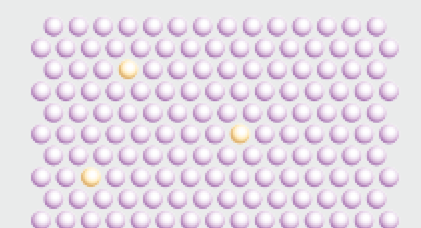
El tamaño sí importa

Mediante un meticuloso análisis estadístico, los autores de este trabajo demostraron que los nanocristales de oro dopante se sitúan aleatoriamente en la superred, siempre y cuando tengan el mismo tamaño que los nanocristales del huésped. La probabilidad de que cada posición de la red sea ocupada por una partícula de oro dopante puede considerarse fija y viene determinada por la relación entre el número de partículas de oro y de semiconductor presentes en la suspensión a partir de la cual se originó la superred. Esta ocupación aleatoria resulta, por término medio, en una distribución uniforme por toda la estructura (igual que los dopantes atómicos en un cristal de silicio) y permite aumentar gradualmente la concentración del dopante sin causar daños en la estructura reticular del material huésped.

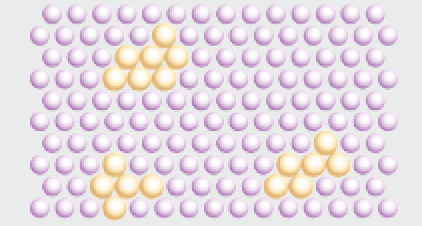
La obtención de una ocupación reticular aleatoria de esas características

DOPAJE POR SUSTITUCIÓN

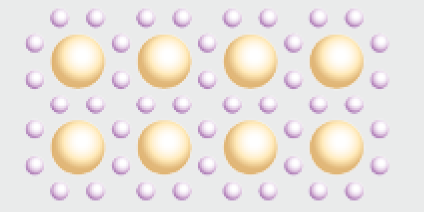
Las superredes son conjuntos ordenados de partículas nanoscópicas idénticas. Cuando algunas de ellas se sustituyen por impurezas, se obtienen distintas disposiciones estructurales, según cuál sea la relación de tamaños entre las partículas extrañas (dopantes) y las del huésped. Se ilustran aquí tres situaciones posibles para una superred de nanocristales de seleniuro de cadmio (CdSe, *lila*) dopada con nanopartículas de oro (*amarillo*).



Sustitución aleatoria
Cuando los nanocristales de oro son idénticos en tamaño a las partículas de CdSe, estos se alojan de forma aleatoria en la superred huésped.



Segregación de fases
Cuando los dopantes de oro no tienen el mismo tamaño que las partículas de CdSe, se observa un agrupamiento de los distintos tipos de partículas.



Superredes binarias
Cuando los tamaños de partícula son distintos también pueden formarse dos subredes en las que los dos tipos de nanocristales ocupan posiciones específicas.

no constituye ni mucho menos un logro trivial, ya que podrían haberse formado otros dos tipos de estructuras. La primera alternativa ocurriría por una segregación de fases; es decir, cuando se originan estructuras separadas de nanocristales de huésped y de dopante. Esto puede suceder debido a que las nanopartículas de oro cristalizan antes que el resto si la atracción entre ellas es mayor que la ejercida entre las nanopartículas del huésped. Cargnello y sus colegas observaron que la segregación de fases se produce si los dos tipos de nanopartículas difieren en tamaño. La segunda posibilidad corresponde a la formación de una superred binaria: una estructura cristalina bien definida que consta de dos subredes en las que los dos tipos de nanocristales ocupan posiciones específicas. De hecho, la disposición ordenada de los dopantes en estas superredes binarias puede verse como la estructura opuesta a las disposiciones aleatorias de dopante en las soluciones sólidas presentadas por el equipo de Cargnello.

Para entender la aleatoriedad observada, quizá lo mejor sea partir de un modelo en el cual los nanocristales se consideran partículas esféricas que no se atraen entre sí en la suspensión. Se trata de una suposición realista, ya que las partículas se hallan recubiertas por moléculas orgánicas (ligandos) similares a las moléculas de hexano usadas en la suspensión inicial; esto significa que el disolvente impide las interacciones entre los ligandos de dos nanocristales adyacentes y solo permite atracciones débiles entre los núcleos de las partículas. Si estas atracciones núcleo-núcleo son muy pequeñas o similares en magnitud para los nanocristales de oro y del huésped, entonces puede esperarse una mezcla aleatoria sin segregación, suponiendo que ambos tipos de partículas tengan el mismo tamaño. Sin embargo, los autores apuntan que se establece una sutil competición entre el dopaje aleatorio y la segregación, que depende, por ejemplo, de la longitud de los ligandos. El modelo propuesto resulta, por tanto, demasiado simple.

Uno de los factores que impulsa la extensa investigación sobre superredes de nanocristales radica en la perspectiva de diseñar materiales que posean ciertas propiedades ópticas, electrónicas o magnéticas, por el momento no disponibles, que surgen de interacciones dipolares o mecanicocuánticas entre sus bloques constituyentes. Cargnello y sus colaboradores han hallado que la conductividad electrónica de los materiales de PbSe se incrementa por un factor de 10^6 cuando la concentración de nanocristales de oro dopante supera el 16,5 por ciento de la cantidad total de nanocristales. Su trabajo, por tanto, se suma al creciente conocimiento en este campo al demostrar que el dopaje por sustitución posibilita la manipulación de dichas propiedades.

—Daniel Vanmaekelbergh
Instituto Debye de Ciencia de Nanomateriales
Universidad de Utrecht

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 524, págs. 418-419, 2015. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2015

PARA SABER MÁS

Nanocrystal solids: A modular approach to materials design. Dmitri V. Talapin en *MRS Bulletin*, vol. 37, págs. 63-71, 2012.
Long-range orientation and atomic attachment of nanocrystals in 2D honeycomb superlattices. M. P. Boneschanscher et al. en *Science*, vol. 344, págs. 1377-1380, 2014.
Substitutional doping in nanocrystal superlattices. M. Cargnello et al. en *Nature*, vol. 524, págs. 450-453, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Nanomateriales a la carta. Beatriz H. Juárez y Luis M. Liz Marzán en *IyC*, diciembre de 2014.

CONSERVACIÓN

Humanos y carroñeros: una larga historia de encuentros y desencuentros

Mientras que nuestros antepasados competían con estos animales por la carroña, hoy nos beneficiamos de los importantes servicios ecológicos que nos ofrecen

JOSÉ A. SÁNCHEZ ZAPATA, MARCOS MOLEÓN Y ZEBENSUI MORALES REYES

La eficacia de los carroñeros, en particular de los buitres, para localizar y consumir las carroñas en intervalos cortísimos de tiempo (generalmente horas) es un hecho que no ha dejado de sorprender. Pero, a pesar de la admiración que estos animales nos despiertan, algunas prácticas y actuaciones humanas han puesto en peligro su supervivencia y están alterando muchos de los servicios y ventajas que ofrecen a nuestra especie.

A fin de entender mejor nuestra interacción con los animales carroñeros y su estado de conservación, desde hace varios lustros nuestro grupo, en colaboración con expertos de distintos centros y países, venimos siguiendo las poblaciones de estos animales y estudiando el consumo de carroñas en los cinco continentes. Una pregunta fundamental que nos hemos planteado es cómo ha ido cambiando la interacción entre humanos y carroñeros a lo largo de nuestra larga historia de convivencia.

Una relación ancestral

Para dar respuesta a esa cuestión hemos revisado las interacciones entre humanos y carroñeros desde la aparición de los primeros homínidos en África. Un número creciente de datos indica que los humanos primitivos que comían habitualmente carne no cazaban sus propias presas, sino que aprovechaban los cadáveres de megaherbívoros atacados por dientes de sable y otros grandes depredadores. De este modo, algunos eones atrás habríamos formado parte de un mismo gremio con el resto de los animales carroñeros y, por tanto, competiríamos con ellos por los mismos recursos.

Aparte de beneficiarse de los animales recién cazados por los depredadores,

aquellos primeros humanos (que pueden considerarse «carroñeros facultativos», dado que consumían carroña de forma oportunista) aprendieron a descifrar los movimientos de los buitres («carroñeros obligados») para encontrar más carroñas ocultas en el paisaje.

La ingesta regular de carne parece haber sido un factor decisivo en el desarrollo del cerebro humano. La necesidad de encontrar suficientes carroñas, un recurso muy efímero y que podía hallarse lejos, y de defenderse a la vez de los depredadores que rondaban sus presas probablemente facilitó el desarrollo del lenguaje, la cooperación en el grupo y quizá la capacidad de correr largas distancias. Asimismo, las primeras herramientas tuvieron que perfeccionarse para desgarrar los duros tejidos de los grandes herbívoros y fragmentar sus huesos para acceder a los tuétanos. Atendiendo al concepto de servicio ecosistémico (todo aquel beneficio que los ecosistemas y la biodiversidad proporcionan a los humanos), podríamos decir que desde nuestros primeros tiempos los carroñeros nos han proporcionado decisivos servicios de aprovisionamiento y culturales, al inspirarnos el uso de herramientas y estrategias de búsqueda.

Hace dos millones de años, los humanos mejoramos las técnicas de caza, de tal manera que nos convertimos en los depredadores más eficientes [*véase* «El origen de la caza en los humanos», por Kate Wong; Investigación y Ciencia, junio de 2014]. Ello tuvo graves consecuencias para los grandes animales depredadores y megaherbívoros, que terminaron por extinguirse en la mayor parte de los continentes. La relación con los carroñeros también cambió de modo profundo. Debido a que los humanos pasaron de consumir carroña a generarla, la interacción dejó de ser principalmente competitiva y los carroñeros se vieron altamente beneficiados. Los buitres estarían íntimamente ligados a estos cazadores, por lo que no es de extrañar que estos últimos utilizaran plumas y garras de carroñeros entre los primeros ornamentos simbólicos.

Pero fue con la aparición de la ganadería, hace 12.000 años, cuando la interacción entre los humanos y los carroñeros se intensificó. Los ungulados domésticos sustituyeron a los silvestres en buena parte del planeta, y los grandes carroñeros se convirtieron en nuestros comensales y mutualistas al aportarnos varios servicios. El hecho de que los buitres eliminaran los cadáveres, incluso de los propios humanos, ha limitado entre otras cosas el desarrollo de enfermedades y la abundancia de depredadores de tamaño medio. Precisamente en este período los valores espirituales, estéticos y religiosos alcanzaron su máximo esplendor. Diversas culturas (todavía hoy en Asia) ofrecían los cuerpos de sus familiares a los buitres, y especies como los cóndores en el continente americano y otros buitres en Egipto se convirtieron en elementos clave del simbolismo religioso de pueblos milenarios.

Pero las relaciones entre los humanos y los carroñeros han cambiado una vez más y, en la actualidad, son uno de los grupos taxonómicos más amenazados del planeta. Las sociedades humanas modernas y los carroñeros se enfrentan a nuevos retos en su convivencia. Uno de ellos deriva de los conflictos entre las políticas sanitarias y la conservación de la naturaleza.



EL BUITRE LEONADO es el carroñero obligado más abundante y de distribución más amplia en la península ibérica.

CORTESÍA DE JOSÉ A. SÁNCHEZ ZAPATA

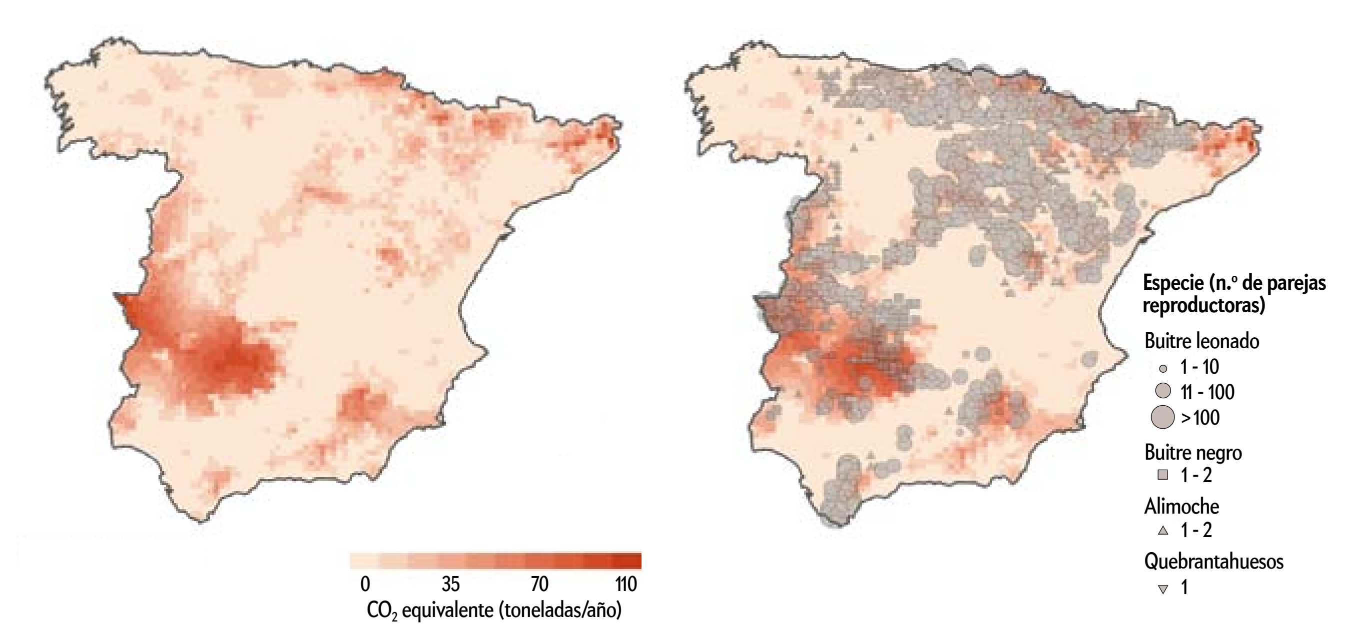
Una ley con repercusiones

Uno de los cambios que ha sufrido la relación entre humanos y carroñeros tiene su origen en una medida sanitaria tomada tras el brote de encefalopatía espongiforme bovina (enfermedad de las vacas locas) en 2001. A raíz de ese brote se desarrollaron normativas europeas (2002/1774/CE) que obligaban a retirar del campo los cadáveres del ganado y a transportarlos para destruirlos en plantas autorizadas.

Este hecho nos motivó a estudiar las repercusiones ecológicas que tenía la eliminación artificial de cadáveres, una función que suelen ejercer los carroñeros de modo natural. Para ello decidimos evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al transporte de las carroñas de ganado extensivo en España.

Para calcular las emisiones de gases de forma espacial seguimos los siguientes pasos. Primero dividimos la península ibérica en cuadrículas de diez kilómetros de lado y estimamos la biomasa de cadáveres generada al año en cada una de ellas, usando el peso medio y la tasa de mortalidad de cada una de las especies de ganado estudiadas (bovinas, ovinas, caprinas y porcinas). Luego, mediante un análisis de redes y un sistema de información geográfica, calculamos las distancias recorridas por los camiones desde el campo hasta las plantas autorizadas de eliminación de cadáveres (basándonos en la red nacional de carreteras). Una vez conocidas estas distancias, calculamos las emisiones de gases asociadas al transporte de acuerdo con los datos del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. Nuestro estudio cifra las emisiones en España en 77.344 toneladas de dióxido de carbono (CO_2) al año debido a la eliminación de los cadáveres por los camiones.

Por otro lado, observamos una fuerte asociación entre las emisiones de CO_2 y la distribución y la riqueza de carroñeros



ELIMINACIÓN DE CARROÑAS Y EMISIÓN DE GASES. **El transporte de cadáveres de ganado desde el campo hasta las plantas de procesamiento para cumplir con una normativa europea generaba gases de efecto invernadero, cuya distribución espacial en España fue calculada por los autores (*izquierda*). Se observó que las zonas de mayores emisiones coincidían precisamente con las de mayores poblaciones de aves carroñeras (*derecha*), las cuales eliminan de forma natural los cadáveres. Se demostró, por tanto, que la gestión artificial de las carroñas en nuestro país resultaba innecesaria y perjudicial. (La magnitud CO_2 equivalente corresponde a la cantidad de CO_2 que tendría el mismo potencial de calentamiento global que una mezcla dada de gases de efecto invernadero.)**

MODIFICADO POR LOS AUTORES DE: «SUPPLANTING ECOSYSTEM SERVICES PROVIDED BY SCAVENGERS RAISES GREENHOUSE GAS EMISSIONS». POR Z. MORALES-REYES ET AL. EN *SCIENTIFIC REPORTS*, VOL. 5, 7811, ENERO DE 2015

obligados en las cuadrículas. En otras palabras, las áreas que originan las mayores emisiones de gases son las zonas mejor conservadas y muestran las mayores densidades de buitres, esto es, un mayor potencial para eliminar la carroña de forma natural. De hecho, los buitres suelen consumir los cadáveres de ganado en menos tiempo del que tardan los camiones en recogerlos.

Por consiguiente, la aprobación de esta normativa originó unas emisiones innecesarias, especialmente si tenemos en cuenta que España es unos de los países que más tiene que pagar para cumplir con el protocolo de Kioto. Además, la medida supone unos pagos anuales de unos 40 millones de euros por parte de los ganaderos y de las administraciones públicas a las compañías de seguros encargadas del transporte de los cadáveres.

Nuestro estudio demostró que la suplantación del servicio ofrecido por los carroñeros no solo tuvo consecuencias negativas para las poblaciones de buitres, que vieron escasear su fuente de alimento, sino también costes ambientales y económicos importantes e innecesarios.

Afortunadamente, los datos aportados por esta y otras investigaciones, junto a la presión ejercida por ganaderos y gestores, ha llevado a la aprobación de una nueva normativa europea (2011/142/CE), que se trasladó a España a través del Real Decreto 1632/2011. Esta permite de nuevo el abandono de los cadáveres de ganado extensivo en ciertas áreas denominadas «zonas de protección para la alimentación de especies necrófagas de interés comunitario». Aunque esta normativa aún está lejos de su total implementación en muchas comunidades autónomas, sin duda supone un importante paso hacia la conservación de los carroñeros en nuestro país. En futuros estudios pretendemos evaluar la efectividad de esta nueva normativa para la conservación de los carroñeros y para la sociedad en términos de ahorro de emisiones de gases.

Amenazas antiguas y nuevas

Otro de los riesgos que sufren los carroñeros deriva del empleo de sustancias tóxicas por los humanos. Parte del declive de sus poblaciones se ha debido a un efecto indirecto de la persecución de otros depredadores mediante el uso de venenos. De hecho, el veneno sigue siendo una de las principales causas de mortalidad no natural de la fauna silvestre en numerosas regiones del planeta.

Pero también han surgido nuevas amenazas que pueden afectar la viabilidad de los buitres. Uno de los riesgos emergentes más importantes se debe a la utilización de fármacos veterinarios tóxicos. No hay más que recordar lo ocurrido en el subcontinente indio en los años noventa del siglo xx, donde las poblaciones de buitres llegaron casi a extinguirse a causa del uso del diclofenaco como antiinflamatorio para el ganado doméstico. Durante esa década se produjo un descenso de entre un 95 y 99 por ciento en las poblaciones de buitres de esa región. Diversos experimentos demostraron que los buitres se mostraban muy sensibles a este fármaco (incluso a bajas dosis), que se hallaba presente en los cadáveres del ganado del que se alimentaban. Afortunadamente, tras el cúmulo de pruebas científicas y la aparición de medicamentos alternativos, como el meloxicam, que resulta inocuo para los buitres, se consiguió la prohibición del diclofenaco en los países del subcontinente indio.

Paradójicamente, a pesar de lo que se sabía, en España (hogar de más del 95 por ciento de los buitres europeos) fue aprobado el uso del diclofenaco en 2013. Se trata de una lamentable e inoportuna decisión que podría convertirse en una de las principales amenazas para los carroñeros, en especial los buitres. La comunidad científica y las ONG conservacionistas ya han abogado firmemente

por su retirada. También han señalado la necesidad de una evaluación más exhaustiva de los fármacos de uso veterinario para minimizar su impacto sobre la biodiversidad y el funcionamiento general de los ecosistemas.

Otra de las causas emergentes de mortalidad de los carroñeros son los accidentes que estos sufren en los parques eólicos. De hecho, en algunas zonas en las que coinciden elevadas poblaciones de carroñeros y parques eólicos, los accidentes se han convertido en el principal motivo de muerte en especies como el buitre leonado y el alimoche. Nuestros estudios apuntan a la necesidad de evaluar y ordenar espacialmente la instalación de los parques eólicos para minimizar este conflicto.

Los buitres en España, una oportunidad y una responsabilidad

A pesar de todo lo expuesto, España sigue acogiendo las mayores poblaciones de buitres de Europa (y quizá del planeta). Tras décadas de persecución de carnívoros y rapaces, los buitres estuvieron a punto de extinguirse en el país, como sucedió en amplias zonas de Europa. Afortunadamente, la protección de estas especies llegó a tiempo. Además, la mayor concienciación social y la persistencia de la ganadería extensiva ha permitido una recuperación progresiva de nuestros buitres. Ello convierte nuestro país en el principal responsable de su conservación en el continente. Pero también tenemos la oportunidad de disfrutar de los servicios que nos proporcionan estas aves.

En términos generales, la percepción social de los buitres y de su papel en el funcionamiento de los ecosistemas es bastante positiva. No en vano, además de cumplir una importante función ecológica, son aves de gran tamaño, fáciles de observar y animadoras de los cielos de nuestras montañas, desde el estrecho de Gibraltar hasta los Pirineos. Son protagonistas también de ambiciosos y exitosos proyectos de reintroducción, como el del quebrantahuesos en Andalucía, y beneficiarios de los programas de recuperación realizados con buitres ibéricos en otras regiones europeas, desde el macizo central francés hasta los Balcanes. Todo lo cual representa una nueva oportunidad para reconciliarnos con nuestros viejos compañeros en el viaje evolutivo.

—José A. Sánchez Zapata,
Marcos Moleón
y *Zebensui Morales Reyes*
Dpto. de biología aplicada
Universidad Miguel Hernández
Alicante

PARA SABER MÁS

Humans and scavengers: The evolution of interactions and ecosystem services. M. Moleón et al. en *BioScience*, vol. 64, págs. 394-403, marzo de 2014. **dx.doi.org/10.1093/biosci/biu034**

One health approach to use of veterinary pharmaceuticals. A. Margalida et al. en *Science*, vol. 346, págs. 1296-1298, diciembre de 2014. **dx.doi.org/10.1126/science.1260260**

Supplanting ecosystem services provided by scavengers raises greenhouse gas emissions. Z. Morales-Reyes et al. en *Scientific Reports*, vol. 5, 7811, enero de 2015. **dx.doi.org/10.1038/srep07811**

EN NUESTRO ARCHIVO

Carroñeo y evolución humana. R. J. Blumenschine y John A. Cavallo en *IyC*, diciembre de 1992.

El hombre en los programas de conservación. Peter Kareiva y Michelle Marvier en *IyC*, diciembre de 2007.

COSMOLOGÍA

Campos magnéticos cósmicos: reliquias de la gran explosión

La estructura de los campos magnéticos intergalácticos podría ayudar a entender la asimetría entre materia y antimateria en el universo

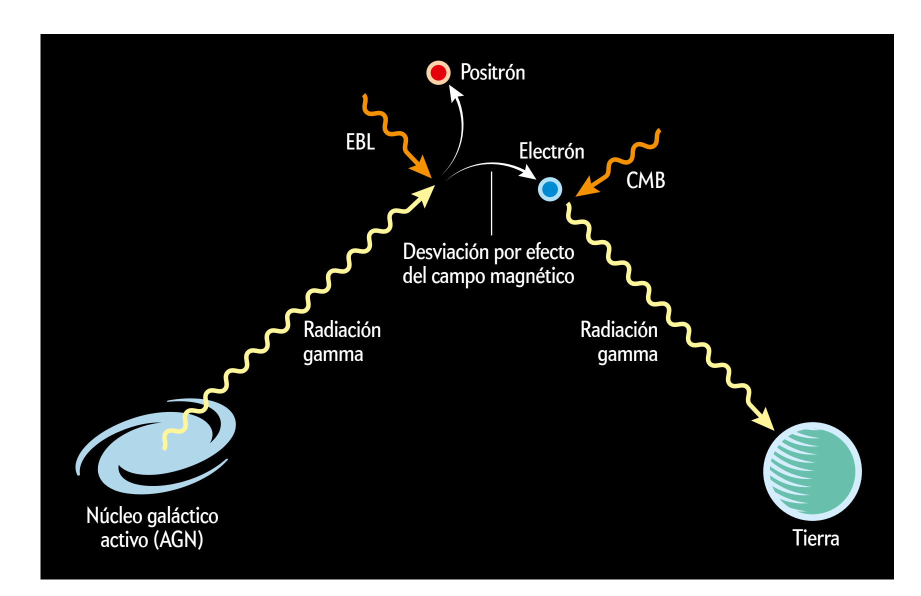
FRANCESC FERRER

Los efectos del magnetismo en el cosmos se han observado en todo tipo de entornos, desde el centro de la Vía Láctea hasta los núcleos galácticos activos (AGN, por sus siglas en inglés) situados en los confines del universo. La energía magnética desempeña un papel determinante en la formación y evolución de estrellas y galaxias, por lo que su estudio resulta clave para entender el universo. Sin embargo, y a pesar de su importancia, el origen de los campos magnéticos cósmicos sigue siendo desconocido.

Se cree que en las galaxias existen «procesos de dinamo» capaces de amplificar campos extremadamente débiles hasta las magnitudes observadas en la actualidad. No obstante, ignoramos la procedencia de esas semillas magnéticas. ¿Fueron generadas por procesos astrofísicos en épocas recientes, o se crearon durante los primeros instantes que siguieron a la gran explosión? La pregunta reviste un gran interés ya que, de confirmarse su origen primigenio, el estudio de los campos magnéticos cósmicos nos permitiría acceder a los primeros instantes del universo y, con ello, a la física de partículas en un régimen de energías imposible de alcanzar en los aceleradores terrestres.

En lo que respecta a la creación de campos magnéticos primordiales, un momento de especial relevancia en la evolución cósmica fue la transición electrodébil: cuando el universo apenas contaba una diezmilmillonésima de segundo de vida, el campo de Higgs adquirió su valor actual en el vacío, con lo que la interacción débil y la electromagnética se diferenciaron y las partículas elementales adquirieron sus respectivas masas. Sorprendentemente, varios estudios teóricos han argumentado que dicho proceso habría dejado una huella en el cosmos visible aún hoy: campos magnéticos helicoidales.

El año pasado, fruto de una colaboración internacional dirigida por Tanmay Vachaspati, de la Universidad estatal de Arizona, y en la que participó el autor de este artículo, descubrimos indicios de la existencia de campos magnéticos helicoidales en el espacio intergaláctico gracias a un análisis del fondo cósmico de rayos



MAGNETISMO CÓSMICO: Un estudio reciente ha inferido la estructura de los campos magnéticos intergalácticos a partir del fondo cósmico de rayos gamma. Los fotones emitidos por un núcleo galáctico activo (AGN) producen pares electrón-positrón al chocar con los fotones del fondo extragaláctico (EBL). El campo magnético (*no mostrado*) desvía las trayectorias de esos electrones y positrones. Después, al colisionar con los fotones del fondo cósmico de microondas (CMB), les imprimen energía extra y los convierten en fotones gamma que son detectados en la Tierra. Los resultados indican que los campos magnéticos intergalácticos presentan una estructura helicoidal. Ello apunta a que habrían sido creados pocos instantes después de la gran explosión, cuando se generó el exceso de materia existente hoy en el cosmos.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN EL AUTOR

gamma. Si hasta entonces las pruebas directas sobre los primeros instantes del universo se remontaban hasta pocos minutos después de la gran explosión (la época de la nucleosíntesis), estas observaciones nos colocan catorce órdenes de magnitud más cerca del nacimiento del cosmos.

Campos magnéticos y bariogénesis

El origen de los campos magnéticos helicoidales se encuentra íntimamente relacionado con uno de los problemas fundamentales de la cosmología moderna: la creación de la materia en el universo. Aunque cabría esperar que materia y antimateria se hubiesen generado en proporciones idénticas durante la gran explosión, sabemos que en el cosmos abunda la materia, no la antimateria. ¿A qué se debe esta asimetría?

A finales de los años sesenta, el físico ruso Andréi Sájarov descubrió que el exceso de materia en el universo podría explicarse siempre y cuando hubiese interacciones que cumpliesen con ciertos requisitos técnicos (en concreto, que no respetasen la simetría *CP* ni la conservación del número bariónico fuera del equilibrio térmico). Poco después, se descubrió que la transición electrodébil permitía la aparición de una clase de procesos, llamados esfalerones, compatibles con tales condiciones.

En los años noventa, Vachaspati conjeturó que cada esfalerón produciría un campo magnético helicoidal; en concreto, uno en el que las líneas de campo dibujarían anillos con una estructura equivalente a la de una espiral, o rosca. Esta hipótesis fue confirmada en la última década por el autor junto con el grupo de Vachaspati mediante simulaciones numéricas de las ecuaciones de la teoría electrodébil.

Efectos sobre la radiación gamma

¿Es posible detectar esos campos magnéticos helicoidales en el universo actual? Sin duda, nuestra búsqueda nos obliga a alejarnos de la Vía Láctea, ya que cualquier campo primordial presente en ella habrá sido amplificado y procesado por la dinamo galáctica, deformando la configuración inicial. Por esta razón, nuestro trabajo se basó en las observaciones del fondo difuso de radiación gamma realizadas por el satélite Fermi, de la NASA.

A primera vista, puede parecer extraño que la radiación gamma nos permita obtener información sobre los campos magnéticos. Sin embargo, parte de este fondo cósmico tiene su origen en fotones mucho más energéticos, creados en AGN a millones de años luz de distancia. Dichos fotones poseen energía suficiente para generar pares electrón-positrón, partículas cargadas que, en efecto, sí se desvían en presencia de campos magnéticos. Semejante conversión tiene lugar en el vacío intergaláctico, por lo que sus trayectorias reflejan la estructura de los campos magnéticos primordiales, sin procesar. Después, esos electrones o positrones colisionan con los fotones del fondo cósmico de microondas, los cuales adquieren energía extra y se convierten en fotones gamma que son detectados por el satélite Fermi.

Nuestro trabajo, cuyos resultados aparecieron publicados hace unos meses en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, ha demostrado que la radiación gamma estudiada exhibe los efectos de campos magnéticos helicoidales. Su configuración resulta ser mayoritariamente la de una «rosca a derechas», lo que se muestra compatible con los modelos de bariogénesis electrodébil. En particular, este resultado desfavorece los escenarios basados en procesos de leptogénesis a energías mucho más elevadas. Creemos que nuestro análisis constituye un primer paso para investigar, por medio de una técnica observacional inexplorada hasta ahora, la naturaleza de los campos magnéticos cósmicos y el origen de la materia.

—Francesc Ferrer
Universidad de Washington en San Luis

PARA SABER MÁS

Helical magnetic fields from sphaleron decay and baryogenesis. Craig J. Copi et al. en *Physical Review Letters*, vol. 101, n.º 17, 24 de octubre de 2008.

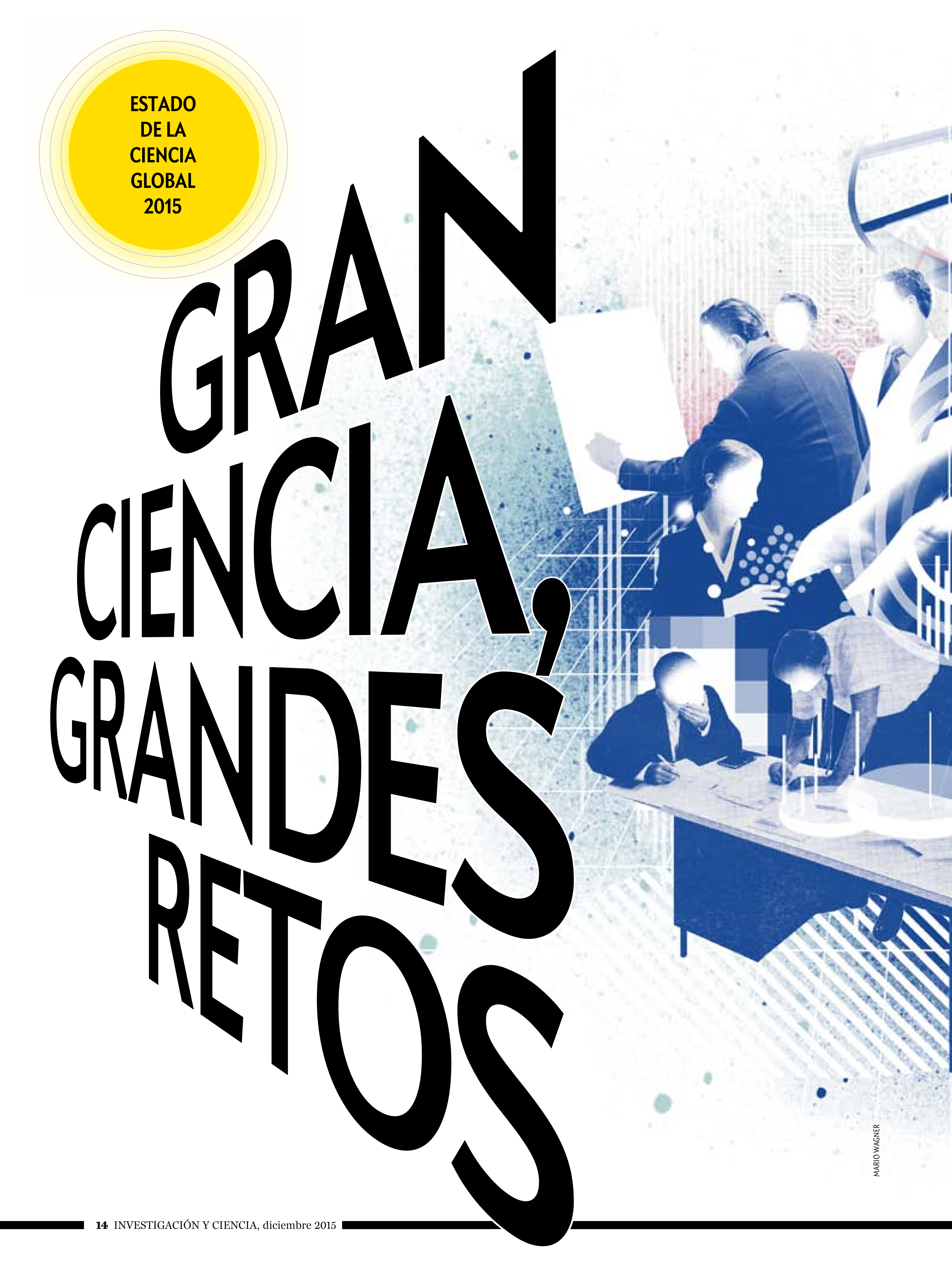
Search for CP violating signature of intergalactic magnetic helicity in the gamma-ray sky. Hiroyuki Tashiro et al. en *Monthly Notices Letters of the Royal Astronomical Society*, vol. 445, n.º 1, págs. L41-L45, 2015.

Intergalactic magnetic field spectra from diffuse gamma-rays. Wenlei Chen en *Monthly Notices Letters of the Royal Astronomical Society*, vol. 450, n.º 4, págs. 3371-3380, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

El origen de la materia. James M. Cline en *IyC*, junio de 2005.

Campos magnéticos cósmicos. Klaus G. Strassmeier en *IyC*, julio de 2010.


ESTADO DE LA CIENCIA GLOBAL 2015
GRAN CIENCIA, GRANDES RETOS
MARIO WAGNER



¿QUÉ SUCEDE CUANDO EN UNA VASIJA SE vierten a la vez el intelecto humano y los problemas de una civilización global y, a continuación, se agita? La alianza poderosa, y a veces peliaguda, entre la ciencia y la sociedad a la que sirve es el tema del informe especial de este año sobre el «Estado de la ciencia global».

Para empezar, abordamos el fenómeno de la gran ciencia *(big science)*, que nace cuando la sociedad juzga que un área de investigación tiene la importancia suficiente para arrojarle dinero y recursos en cantidad. Pero conjuntar los objetivos y métodos de los investigadores y de los políticos puede resultar difícil. En «Las dificultades del Proyecto Cerebro Humano», que empieza en la página siguiente, el periodista Stephan Theil se centra en los obstáculos de un megaproyecto que la Comisión Europea estableció en 2013 para que el campo de la neurociencia avanzase y para potenciar la ciencia en Europa. Theil muestra lo que puede salir mal cuando una burocracia que pone el dinero y decide desde arriba intenta marcarle el paso al impredecible progreso de los descubrimientos científicos.

Cada vez se recurre más a la ciencia para que elabore programas sociales que evalúen con algún rigor las pruebas objetivas. Hace años, Dean Karlan planteó una ingenua pregunta sobre las iniciativas basadas en los microcréditos, una herramienta prometedora para sacar a la gente de la pobreza: ¿cómo sabemos que de verdad funcionan? Le reconcomía no conseguir una respuesta satisfactoria. Desde entonces, Karlan, ahora en la Universidad Yale, se ha esforzado en que los métodos de la ciencia se apliquen para evaluar la efectividad de los programas contra la pobreza. En «Evaluación científica de los programas contra la pobreza», en la página 23, habla de su búsqueda de una ciencia que acabe con la pobreza y explica qué maneras de proceder han demostrado hasta ahora tener éxito.

Rodrigo Guerrero Velasco ha realizado sus investigaciones sobre sociología desde una atalaya inusual: un ayuntamiento. Ha sido dos veces alcalde de Cali, ciudad colombiana de dos millones de habitantes. Desde ese puesto ha podido aportar a la gobernación algo del método científico. En particular, para atajar una epidemia de homicidios, recurrió a métodos basados en datos empíricos. Aprovechando su educación doctoral en Harvard como epidemiólogo, elaboró un programa consistente en plantear hipótesis sobre las causas de los crímenes, aplicar medidas que las abordasen y comprobar si funcionaban. Los resultados fueron tan llamativos que sirvieron de modelo para Bogotá y otras ciudades (*véase la página 26*).

Completamos la sección con un gráfico (*página 20*) que representa el volumen económico de la investigación científica en las principales naciones e instituciones del mundo, así como el coste asociado a varios grandes proyectos. Los resultados, esperamos, le sorprenderán y encandilarán.

LA REDACCIÓN

LAS DIFICULTADES DEL PROYECTO CEREBRO HUMANO

A los dos años de su inicio, este proyecto multimillonario de simulación del cerebro está haciendo agua. ¿Mala gestión o limitaciones de la gran ciencia?

STEFAN THEIL

Henry Markram lleva décadas soñando con aplicar ingeniería inversa al cerebro humano. En 1994, por entonces investigador posdoctoral en el Instituto Max Planck de Investigación Médica en Heidelberg, se convirtió en el primer científico en registrar la actividad recíproca de dos neuronas vivas; mediante pipetas microscópicas logró medir las señales eléctricas que intercambiaban dos neuronas de rata recién extraídas. Su trabajo desveló el proceso por el que las sinapsis se fortalecen y debilitan, lo que posibilitó el estudio y la modelización de los procesos de aprendizaje en el cerebro. Gracias a este trabajo, fue nombrado investigador principal en el prestigioso Instituto Weizmann de Ciencias, en Rehovot, y, para cuando fue ascendido a profesor en 1998, ya era uno de los científicos más reconocidos en su campo.

Entonces, comenzó su frustración. Si bien los investigadores de todo el mundo publicaban decenas de miles de estudios neurocientíficos al año, ni nuestros conocimientos sobre las funciones básicas del cerebro ni nuestra capacidad para tratar los trastornos mentales parecían progresar mucho. La consternación de Markram también era personal. Mientras vivía todavía en Alemania, a su hijo Kai le diagnosticaron autismo. Según explicó a *The Guardian* en 2013, deseaba poder introducirse en una simulación del cerebro de su hijo y ver el mundo como él lo veía. El único modo de lograrlo, razonaba, consistía en ir más allá de los experimentos aislados sobre comportamiento, enfermedades y anatomía cerebral; en su lugar, proponía modelizar los circuitos del cerebro humano completo.

En una charla TED en 2009, expuso a la audiencia su idea de realizar una simulación matemática de las 86.000 millones de neuronas y los 100 billones de sinapsis del cerebro en una supercomputadora. «Podemos conseguirlo en diez años», prometió al público, sugiriendo que tal modelo podía incluso tener consciencia. Aseguró a los asistentes que, pasados esos diez años, les enviarían un holograma para que hablara con ellos. En diferentes charlas, entrevistas y artículos, señaló que un modelo matemático del cerebro permitiría avances tan fundamentales como diseñar fármacos, prescindir de ciertos experimentos con animales y mejorar el conocimiento de trastornos como el alzhéimer. Como si ello no bastara, el modelo abriría las puertas a una tecnología capaz de construir ordenadores más rápidos y crear robots con capacidades cognitivas y, posiblemente, inteligencia. Muchos neurocientíficos se mostraron escépticos, pero Markram contó con numerosos defensores. La Unión Europea pareció vindicar su visión en enero de 2013, al concederle mil millones de euros para un proyecto de diez años de duración [*véase* «El proyecto cerebro humano», por Henry Markram; Investigación y Ciencia, agosto de 2012].

Menos de dos años después, el Proyecto Cerebro Humano (HBP, por sus siglas en inglés; www.humanbrainproject.eu) hace agua; se ha convertido en objeto de controversia e incluso de mofa. La prensa científica lo ha ridiculizado refiriéndose a él como «confusión cerebral» o «cerebro averiado». En YouTube hay colgada una parodia del proyecto, un programa español de entrevistas (*Ratones coloraos*, de Jesús Quintero) donde el invitado aparece sufriendo un ataque de risa incontrolable mientras los falsos subtítulos indican que está describiendo el proyecto de Markram (el invitado, en realidad, explica una anécdota sobre unas paelleras). Varios científicos que conocen a Markram en persona lo describen como una suerte de genio que se ha descarriado. Perdió su puesto en la dirección ejecutiva del proyecto y sus propios directivos le han pedido que no hable con la prensa, ni siquiera con nuestra revista. El nuevo director ejecutivo, Christoph Ebell, afirma que el

MARIO WAGNER



científico dejó recientemente de asistir a las reuniones internas del proyecto y que envía a un representante para tratar con el equipo directivo.

El Proyecto Cerebro Humano creó una profunda división en la comunidad neurocientífica europea. Una carta abierta (neurofuture.eu) que criticaba los aspectos científicos y organizativos del HBP recopiló en poco tiempo más de 800 firmas de investigadores. El pasado mes de marzo, tras la amenaza de los firmantes de boicotear lo que pretendía ser una colaboración a escala europea, Markram inició un proceso de mediación para atender las reclamaciones de los críticos. Un comité de veintisiete científicos revisó los argumentos de las dos partes y, con la excepción de dos disidentes, coincidió, punto por punto, con la postura crítica.

En un informe de 53 páginas, los mediadores pidieron una revisión completa del HPB, con la inclusión de un nuevo sistema de gestión y un cambio en el enfoque científico. En estos momentos se está llevando a cabo una gran reorganización del proyecto, y su configuración y orientación futuras están en proceso de cambio. Se esperaba que los Estados miembros, a través de sus ministerios de investigación y otras instituciones, contribuyeran con 500 millones de euros al presupuesto total. Sin embargo, pocos han manifestado todavía su compromiso, lo que podría afectar a la envergadura y al calendario del ambicioso programa.

La mayoría de las críticas se han centrado en Markram y su estilo de gestión, pero esta visión resulta parcial. Sin lugar a dudas, Markram está intentando hacer buena ciencia. Pero, a pesar de la cantidad de errores que se hayan cometido en las dependencias del HBP en Suiza, el origen del problema se sitúa unos 500 kilómetros al norte, en Bruselas. Allí, en la sede de la Comisión Europea, el sistema de financiación de la gran ciencia, que casa política con objetivos científicos y que permite poca transparencia y ejercita un control insuficiente, es el que ha consentido el caos en el que se ha convertido el proyecto. El verdadero problema no reside en el HBP, sino en el proceso de toma de decisiones en la Unión Europea, explica Andreas Hertz, profesor de neurociencia computacional en la Universidad Ludwig Maximilian de Múnich y miembro del comité mediador.

GRANDES PROYECTOS, GRANDES CUESTIONES

Desde que la gran ciencia surgió en las postrimerías de la Segunda Guerra Mundial y del Proyecto Manhattan, investigadores y expertos en política científica han debatido su eficacia. El ya fallecido Alvin M. Weinberg, director del Laboratorio Nacional de Oak Ridge, se preguntaba en *Science* en 1961 si los megaproyectos como los colisionadores de partículas y los vuelos espaciales tripulados estaban «hundiendo la ciencia» o «arruinándonos». Sostenía que la gran ciencia era responsable de inyectar un «tono periodístico» a las investigaciones, lo «que, en esencia, está en conflicto con el método científico», porque se crea una situación en la que «prima el espectáculo sobre el análisis profundo». Además, le preocupaba que los investigadores dispusieran de grandes sumas de capital porque «puede verse cómo algunos se dedican a gastar dinero en lugar de pensar».

Esa inquietud sigue ahí, y ninguna empresa reciente la ha puesto de manifiesto de un modo tan claro como el HBP. Hoy la gran ciencia consiste en proyectos a gran escala, con numerosas colaboraciones, a menudo interdisciplinares, que Gobiernos de todo el mundo financian cada vez más en un intento por impulsar la innovación. La neurociencia solo constituye la última disciplina en la que los presupuestos multimillonarios (antaño reservados a defensa y tecnología aeroespacial) se han extendido y multiplicado.

Existen razones importantes que explican la proliferación de los megaproyectos. Muchas áreas de investigación se han vuelto tan complejas y costosas que la colaboración a gran escala es la mejor herramienta para progresar. Este modo de trabajar ha sido la norma en física durante mucho tiempo, puesto que sondear las fronteras de la naturaleza requiere enormes aceleradores de partículas como el Gran Colisionador de Hadrones del CERN, cerca de Ginebra. En biología, la gran ciencia debutó en 1990 con el Proyecto Genoma Humano: trece años de trabajo y un presupuesto en torno a los tres mil millones de dólares (en dinero de 1991). Fue cofundado por los Institutos Nacionales de Salud y el Departamento de Energía de EE.UU. para secuenciar el ADN. A principios de 2010 fue la neurociencia la que parecía estar preparada para un gran salto. Casi simultáneamente con el Proyecto Cerebro Humano europeo, EE.UU. dio a conocer la iniciativa BRAIN (siglas en inglés de Investigación del Cerebro mediante el Desarrollo de Neurotécnicas Innovadoras). Israel, Canadá, Australia, Nueva Zelanda, Japón y China también han anunciado grandes proyectos sobre el cerebro. Thomas R. Insel, director del Instituto Nacional de Salud Mental (INSM), una de las agencias estadounidenses organizadoras de la iniciativa BRAIN (junto con la Fundación Nacional para la Ciencia y la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzada, entre otras), afirma que la preocupación por la propagación y los costes de los trastornos mentales, junto con las expectativas sobre las nuevas técnicas de manipulación cerebral como la optogenética, incitaron a políticos y científicos a apoyar una nueva era de la neurociencia. Toda una generación sueña hoy con hacer este tipo de investigación, no solo en EE.UU., sino en todo el mundo, afirma Insel.

No obstante, al mostrar la facilidad con la que descarrila un proyecto de esa magnitud, el HBP pone de relieve las limitaciones de las grandes inversiones cuando se abordan problemas difíciles. Aunque esta estrategia se ha demostrado eficaz cuando se aplica a objetivos técnicos bien definidos, como construir cohetes o



Stefan Theil es periodista y editor. En fecha reciente ha disfrutado de la beca Joan Shorenstein para periodistas interesados en las políticas públicas en la Universidad Harvard.

EN SÍNTESIS

En 2013, la Comisión Europea concedió al neurocientífico Henry Markram mil millones de euros para cumplir un objetivo audaz: crear una simulación del cerebro humano.

La iniciativa de Markram, el Proyecto Cerebro Humano, está hoy haciendo agua. Los críticos atribuyen la culpa a la dirección del proyecto y a unos objetivos excesivamente ambiciosos.

Con todo, gran parte de los errores recae en Bruselas, ya que los financiadores del proyecto antepusieron la política a la ciencia y no ejercieron la supervisión adecuada.

La iniciativa BRAIN estadounidense ha demostrado que los grandes proyectos neurocientíficos pueden tener éxito. El HBP también podría funcionar con la reorganización que se ha puesto en marcha.

secuenciar el genoma, cabe preguntarse si las iniciativas de gran presupuesto, dirigidas por un grupo pequeño de científicos y gestores, son el mejor modo de desarrollar algo tan fundamental como una nueva concepción del cerebro humano.

AUGE Y CAÍDA DEL PROYECTO

A sus 53 años, Markram destaca entre los neurocientíficos de su generación por sus logros como investigador experimental y por su ambición. En 2005 fundó el Proyecto Blue Brain en la Escuela Politécnica Federal de Lausana, en Suiza, para el que IBM contribuyó con una supercomputadora, Blue Gene [*véase* «Simulación cerebral», por Felix Schürmann; Mente y Cerebro n.º 37, 2009]. El proyecto emplea datos y *software* para realizar la simulación de una pequeña porción del cerebro de una rata, centrándose en un conjunto de neuronas conocidas como columna cortical. Pero, mientras que esta iniciativa está generando conocimiento sobre cómo crear modelos matemáticos de algunas partes de la circuitería cerebral, los críticos afirman que la simulación no va a ser de gran utilidad ni va a ayudar mucho a la hora de entender cómo funciona el cerebro. Hoy por hoy, Markram aún no ha publicado ningún artículo exhaustivo sobre los descubrimientos del Blue Brain en una revista con revisores externos. Con todo, en poco tiempo preparó un borrador para ampliar el proyecto y proponer una idea todavía más ambiciosa: crear una simulación del cerebro humano en un superordenador.

Además de sus credenciales científicas, Markram mostró un gran talento a la hora de defender su proyecto. Carismático y fotogénico, contaba con muchos seguidores y una gran reputación como gran visionario en el campo de la neurociencia. También despachaba con rapidez a sus críticos tachándolos de reticentes a adoptar el «cambio de paradigma» que, según él, representa el HBP. Muchos de esos críticos cuestionaron los aspectos científicos fundamentales del proyecto. Neurocientíficos de renombre afirman que, incluso aunque fuera posible obtener un modelo del cerebro con el detalle concebido por Markram, no aprenderíamos nada sobre cognición, memoria o emociones (al igual que copiar el *hardware* en un ordenador, átomo por átomo, no nos diría gran cosa sobre el complejo *software* que funciona en su interior). Otros acusan a Markram de exagerar los logros potenciales del HBP. «Todos conocemos a Henry, siempre ha sido un megalómano. Ninguno creemos que lo que ha prometido se pueda realizar», afirma Eilon Vaadia, director del Centro Edmond y Lily Safra de Ciencias del Cerebro de la Universidad Hebrea de Jerusalén.

A pesar del escepticismo de la comunidad científica, Markram supo ganarse a las personas que de verdad importaban: quienes asignan los fondos en la Comisión Europea, que parecen haberse fijado menos en la viabilidad de la propuesta científica que en su posible beneficio económico y político. El proyecto se creó porque los políticos querían hacer algo para que la industria europea remontara, afirma Ebell. En 2009, lo que es hoy la Dirección General de Redes de Comunicación, Contenido y Tecnología de la Comisión Europea, movida por el temor a quedarse muy por detrás de EE.UU. en informática, servicios digitales y otras tecnologías, decidió crear un concurso de proyectos emblemáticos (programa Flagship) financiados con al menos mil millones de euros cada uno. Estas iniciativas, tan propias de política industrial como de ciencia, estaban pensadas para que Europa pudiera tomar la delantera en las tecnologías futuras y emergentes, según un artículo de la Comisión Europea de 2009. La idea de Markran de simular el cerebro en un superordenador (y sus promesas sobre el avance que supondría para la neurociencia, la medicina, la robótica y la tecnología computacional) encajaba muy bien con los burócratas que creían posible un plan integral de innovación «disruptiva» para diez años. «Era justo el tipo de argumento que a alguien como Henry le parecía apasionante, y les dijo exactamente lo que querían oír», explica Ebell. «¿Existe algún político a quien no le gustaría ponerse en pie y decir: "Los europeos estamos construyendo un cerebro"? Es emocionante, es como un lanzamiento espacial.»

Como el programa Flagship fue concebido como un proyecto de cara a la galería que quedaba fuera del proceso usual de financiación científica (y debido al gran presupuesto que debía justificarse), los políticos, burócratas e incluso científicos poseían fuertes motivaciones para exagerar sus promesas. «Estás en una reunión y alguien te dice que lo reescribas para que suene más impactante», explica Ebell. «Entonces empiezas a prometer más, y todo el mundo comienza a repetirlo, incluso los científicos. Se crea un bucle de realimentación; y, con tanto dinero en juego, resulta muy efectivo.»

Un jurado secreto de 25 expertos de todos los rincones de Europa (entre ellos, solo un neurocientífico; el resto pertenecía a otras disciplinas) eligió el HBP y otro proyecto, de entre seis finalistas, para recibir los mil millones de euros cada uno, que serían abonados en cuotas de cien millones. Al contrario de lo que es práctica común en EE.UU., la Comisión Europea no hizo públicos los nombres de los miembros del jurado, ni siquiera después de que se tomara la decisión. En un comunicado enviado a *Scientific American*, la comisión defendió esta práctica como necesaria para prevenir «repercusiones en la vida personal y profesional de los expertos implicados, así como en la calidad y eficacia de los procedimientos».

El otro ganador fue el Proyecto Grafeno, un consorcio de investigadores corporativos y académicos de veintitrés países dispuestos a desarrollar este prometedor nanomaterial que posee numerosas aplicaciones en la electrónica, la energía y otras industrias. El Proyecto Grafeno está diseñado también para ayudar a evitar que la industria europea se quede rezagada con respecto a países asiáticos como Corea del Sur, donde Samsung está desarrollando este material futurista. Pero, a diferencia del HBP, el Proyecto Grafeno ha evitado la controversia y rápidamente se están adhiriendo a él socios de sectores industriales de toda Europa. Un aspecto crucial que lo distingue del primero es que no está basado en la visión de una sola persona; se ha creado para ser integrador, participativo y descentralizado. De este modo, mientras Markram y otros controlaban la estructura y la financiación del HBP, el Proyecto Grafeno es una red abierta y coordinada con flexibilidad por sus directores desde la Universidad de Tecnología Chalmers. Otro aspecto quizá más importante es que el proyecto tiene una misión estrictamente ingenieril: desarrollar técnicas que permitan comercializar un material conocido. Al contrario que la modelización del cerebro, este objetivo no requiere llenar una gran laguna de conocimiento básico.

Inexplicablemente, la Comisión Europea no insistió en que se impusieran los mecanismos de control usuales en la gestión del HBP, que se inició en 2013. El informe de mediación apuntó que los conflictos de intereses abundaban en la administración del proyecto. Asimismo, señaló que Markram, junto con otros dos científicos, no solo controlaban el consejo de dirección y,

Continúa en la página 22

¿CUÁN GRANDE ES LA GRAN CIENCIA?

Los proyectos científicos mastodónticos, como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN, son presentados a menudo como símbolo del empeño humano por descifrar el mundo. Pero ¿cuánto invierte realmente la humanidad en ciencia? Aunque resulta difícil saberlo, comparar algunos datos fiables puede acercarnos a la respuesta.

Proyecto Manhattan
23.000 - 27.000 millones
(2200 millones en 1945)
Coste total
1942-1945

LA BOMBA ATÓMICA

El proyecto Manhattan, en el cual se desarrollaron las primeras bombas atómicas, costó más de 23.000 millones y empleó a 130.000 personas. Para bien o para mal, se convertiría en el modelo de lo que podía lograr la gran ciencia.

Estados Unidos
453.544 millones de dólares*
2012

** Los gastos en investigación y desarrollo de cada economía están expresados en **dólares de paridad de poder adquisitivo**, un tipo de cambio que tiene en cuenta las diferencias en el coste de la vida de los distintos países.*

Iniciativa BRAIN
Más de 300 millones
Inversión federal estadounidense a lo largo de 2015
En marcha desde 2013

Proyecto Cerebro Humano
1630 millones
Coste total previsto del proyecto
2012-2023

CEREBRO HUMANO

Uno de los grandes misterios de la ciencia es cómo emerge la consciencia. Varias iniciativas con presupuestos generosos, como el Proyecto Cerebro Humano, en Europa, y la Iniciativa BRAIN, en EE.UU., intentarán obtener las herramientas básicas para resolver este enigma y para ayudar a curar enfermedades mentales.

Proyecto Genoma Humano
4730 millones†
Coste total del proyecto
1990-2003

Proyecto 100.000 Genomas
471 millones
Inversión actual
2012-2017

GENOMA

Con 4700 millones de presupuesto y trece años de duración, puede que el Proyecto Genoma Humano fuese el primer programa de gran ciencia propiamente dicha en biología y medicina. Una iniciativa más reciente es el Proyecto 100.000 Genomas, el cual intentará secuenciar el genoma completo de 100.000 pacientes del Servicio Nacional de Salud británico para estudiar el vínculo entre genes y enfermedades.

GASTO MUNDIAL EN CIENCIA

Aunque no existe ninguna colección de datos que abarque todo lo que el planeta invierte en ciencia, el gasto en investigación y desarrollo de las mayores economías del mundo permite hacerse una idea de su magnitud.

*† Las cantidades de todos los proyectos han sido convertidas a **dólares estadounidenses de 2015.***

Colisionador propuesto en China
3020 millones
Coste estimado de la construcción
Pendiente de aprobación

Gran Colisionador de Hadrones
5370 millones
Personal, materiales, I+D, ensayos y costes preoperativos
Operativo desde 2008

Fuente Europea de Neutrones por Espalación
2260 millones
Coste proyectado de la obra
Construcción iniciada en 2014

ACELERADORES DE PARTÍCULAS

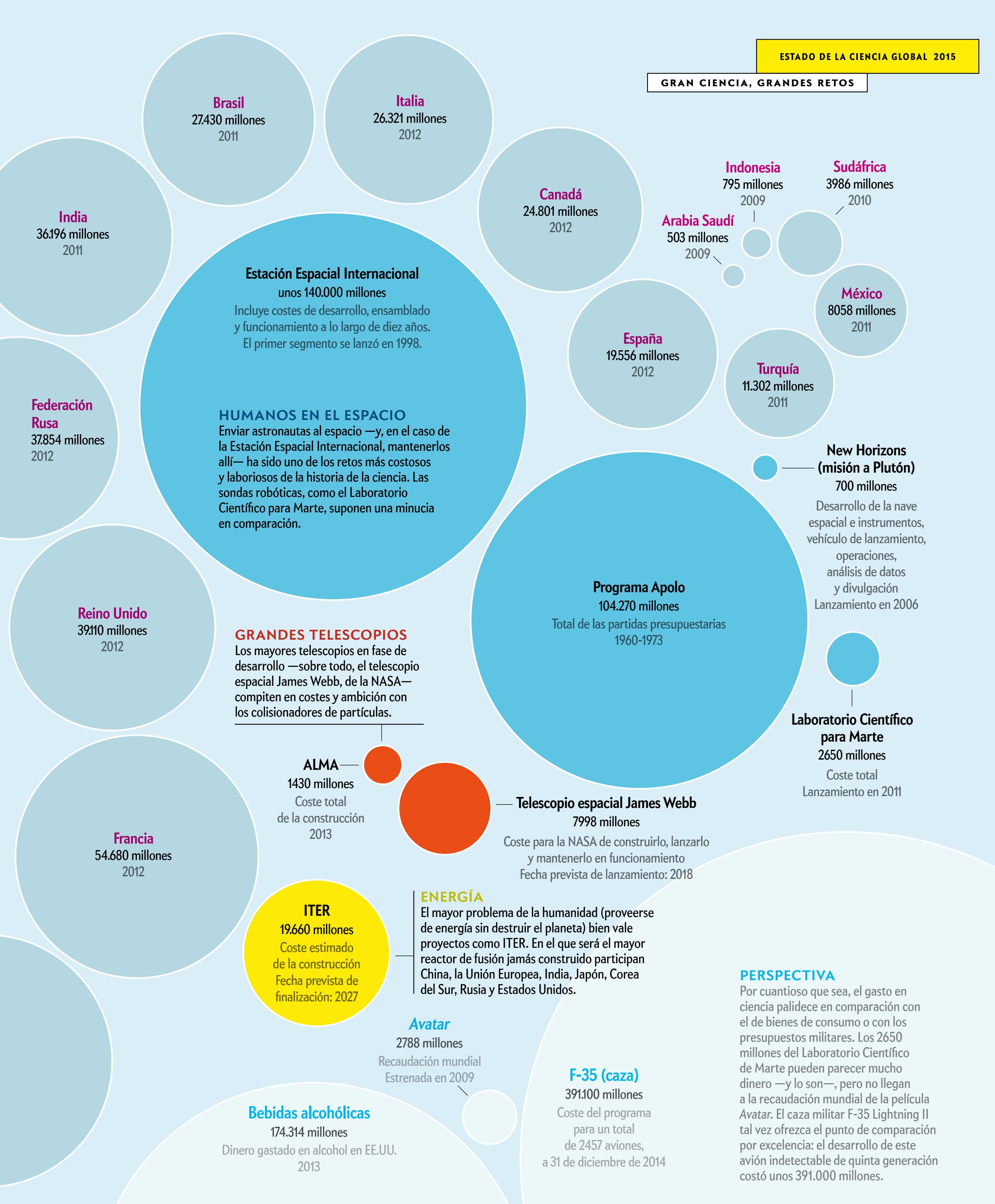
Son caros, enormes y, para los físicos, esenciales: no hay forma de poner a prueba ciertas teorías fundamentales sin hacer chocar partículas a velocidades próximas a la de la luz. El Gran Colisionador de Hadrones del CERN, con un anillo de 27 kilómetros de longitud, es el más grande del mundo. Ahora China considera la construcción de uno mucho mayor.

China
243.293 millones
2012

Corea del Sur
58.380 millones
2011

Japón
148.389 millones
2011

Alemania
100.248 millones
2012



Jen Christiansen (*gráfico*)

FUENTES: INSTITUTO DE ESTADÍSTICA DE LA UNESCO (*gastos nacionales en investigación y desarrollo*); *THE MANHATTAN PROJECT, THE APOLLO PROGRAM, AND FEDERAL ENERGY TECHNOLOGY R&D PROGRAMS: A COMPARATIVE ANALYSIS*, POR DEBORAH D. STINE, INFORME PARA EL CONGRESO DE EE.UU. DEL SERVICIO DE INVESTIGACIÓN, 30 DE JUNIO DE 2009 (*Proyecto Manhattan*); *APOLLO BY THE NUMBERS: A STATISTICAL REPORT*, REVISADO POR RICHARD W. ORLOFF, NASA, SEPTIEMBRE DE 2004 (*Proyecto Apolo*); AGENCIA ESPACIAL EUROPEA (*Estación Espacial Internacional*); INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DEL GENOMA HUMANO (*Proyecto Genoma Humano*); «HUMAN GENOME: UK TO BECOME WORLD NUMBER 1 IN DNA TESTING», OFICINA DEL PRIMER MINISTRO DEL REINO UNIDO ET AL., 1 DE AGOSTO DE 2014 (*Proyecto 100.000 Genomas*); *THE HUMAN BRAIN PROJECT: A REPORT TO THE EUROPEAN COMMISSION*, CONSORCIO HBP-PS, ABRIL DE 2012 (*Proyecto Cerebro Humano*); INICIATIVA BRAIN DE LA CASA BLANCA, www.whitehouse.gov/brain (*Iniciativa BRAIN*); *LHC: THE GUIDE*, CERN, FEBRERO DE 2009 (*Gran Colisionador de Hadrones*); EES, FAQ DE FINANCIACIÓN Y COSTES, europeanspallationsource.se/faq-funding-and-costs (*Fuente Europea de Neutrones por Espalación*); «CHINA PLANS SUPERCOLLIDER», ELIZABETH GIBNEY EN *NATURE*, VOL. 511, 24 DE JULIO DE 2014 (*colisionador propuesto en China*); «ALMA INAUGURATION HERALDS NEW ERA OF DISCOVERY», ORGANIZACIÓN DEL OBSERVATORIO EUROPEO AUSTRAL, 13 DE MARZO DE 2013 (*ALMA*); CONSORCIO ITER, www.iter.org (*ITER*); NASA (*telescopio espacial James Webb, Laboratorio Científico para Marte, New Horizons*); «DEPARTMENT OF DEFENSE SELECTED ACQUISITION REPORTS (SARS) (AS OF DECEMBER 31, 2014)», DEPARTAMENTO DE DEFENSA DE ESTADOS UNIDOS, 19 DE MARZO DE 2015 (*F-35*); BOX OFFICE MOJO (*Avatar*); GASTOS EN ALIMENTACIÓN, SERVICIO DE INVESTIGACIONES ECONÓMICAS DEL DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA DE ESTADOS UNIDOS (*alcohol*).

Viene de la página 19
por tanto, la distribución de los fondos entre el consorcio de 112 instituciones, sino que los proyectos de él y otros miembros del consejo eran beneficiarios de sus propias decisiones económicas. Markram también era miembro de todos los consejos consultivos e informaba a todos al mismo tiempo. «Es una imagen impactante de la toma de decisiones en la UE», explica Peter Dayan, director de neurociencia computacional en la Escuela Universitaria de Londres y miembro del comité mediador. Dayan asegura no poder recordar un proyecto de estas dimensiones dirigido de forma tan atroz, a pesar de que administrar grandes proyectos no reviste una dificultad especial.

La CE empezó a mencionar los problemas de gestión del HBP solo después de la publicación de la carta abierta de los neurocientíficos. Días antes de que los mediadores emitieran su detallado informe, la Comisión presentó su propia evaluación (realizada por un grupo de expertos secreto conocido solo por ella y el HBP), que resultó mucho menos explícita que la de los mediadores pero que, con todo, exigió cambios en el proyecto. La Comisión también dio su beneplácito al proceso de mediación. No obstante, si hubiera ejercido desde el principio una supervisión eficaz, el HBP nunca habría naufragado. Sin la protesta de la comunidad neurocientífica, puede que en estos momentos no llevaran a cabo cambios organizativos en el HBP.

HEMISFERIO IZQUIERDO, HEMISFERIO DERECHO

Hasta ahora, la iniciativa BRAIN está resultando más positiva que el HBP. El presidente Barack Obama la presentó en abril de 2013 como «el próximo gran proyecto de EE.UU.». En un principio fue recibida con una oleada de escepticismo similar. Como ocurrió en Europa, a muchos neurocientíficos del país les preocupaba que la iniciativa estuviera mal concebida y absorbiera fondos de otros proyectos neurocientíficos mientras perseguía unos objetivos imprecisos y quizás inalcanzables.

Sin embargo, en vez de proceder con grupos de expertos a puerta cerrada y revisiones confidenciales, el INSM reaccionó a las críticas posponiendo el proyecto e involucrando a la comunidad neurocientífica. La agencia nombró un grupo de 15 investigadores reconocidos, quienes explicaron el proyecto en una serie de seminarios públicos. Un año de deliberaciones dio como resultado un programa ambicioso e interdisciplinar, cuyo objetivo es desarrollar nuevas técnicas que permitan monitorear y estimular el cerebro. La iniciativa reúne a neurocientíficos, especialistas en nanotecnología e ingenieros de materiales. Juntos deberán resolver cuestiones como la aplicación de estímulos eléctricos a grupos muy pequeños de neuronas, lo que podría hacer posible el tratamiento de afecciones cerebrales con una precisión mucho mayor.

La diferencia fundamental entre los dos proyectos, el europeo y el estadounidense, es que el último no depende de una única estrategia científica. Por el contrario, muchos equipos competirán por subvenciones y desarrollarán innovaciones diferentes y no planificadas. Compiten siguiendo el proceso tradicional de revisión externa del INSM, que impide los conflictos de intereses que han influido en la toma de decisiones en el HBP. La revisión externa no es perfecta (tiende a beneficiar los paradigmas científicos conocidos), y la financiación científica en EE.UU. cuenta con sus propios problemas. Pero la toma de decisiones más competitiva y transparente del proyecto BRAIN está muy lejos de la opacidad política de Bruselas que guió el HBP.

La iniciativa BRAIN tiene muchas posibilidades de éxito, porque, a pesar de su fachada de megaproyecto al estilo de un lanzamiento espacial, constituye un modelo de innovación distribuida que, bajo un paraguas de financiación central, se basa en reglas que estimulan la colaboración. La etiqueta de megaproyecto con la que se presenta quizá corresponda a una estrategia inteligente para recaudar fondos y conseguir apoyos. «Siempre que hablo con miembros del Congreso desean saber cuál es el tema más novedoso», comenta Insel. «No quieren gastar dinero en más de lo mismo.» Además, las grandes ideas innovadoras atraen una amplia cobertura mediática. El resultado es que un megaproyecto, o uno presentado como tal, es a menudo más fácil de vender a los políticos, a sus votantes y a los periodistas. La creencia preponderante en estos tiempos es que la gran ciencia resulta más eficaz, afirma Zachary Mainen, jefe de neurociencia de sistemas de la Fundación Champalimaud, con sede en Lisboa, y uno de los organizadores de la carta abierta contra el HBP. «Pero eso no significa que haya que eliminar a la competencia.»

LEGADO INCIERTO

Desde que aceptó las críticas del informe de mediación, el HBP está sometido a una revisión exhaustiva, lo cual todavía puede convertirlo en un éxito. Ebell afirma que el proyecto está creando una nueva estructura de gestión que no va a concentrar tanto poder en Markram y sus colaboradores más cercanos. Habrá nuevos órganos de supervisión independientes. Se ha vuelto a admitir un subproyecto clave sobre neurociencia cognitiva cuya expulsión del proyecto principal el año pasado aceleró los ataques contra el HBP. También está en marcha un proceso más abierto y competitivo de proyectos de colaboración para acceder a la financiación del HBP. Desde ahora, cada grupo que participa en el consorcio, incluido el de Markram, tendrá que volver a solicitar financiación cada dos años.

El proyecto también se centra ahora más en métodos estadísticos e informáticos que no tienen el único fin de simular el cerebro. Los mediadores criticaron al HBP por crear «expectativas poco realistas» sobre el conocimiento del cerebro y el tratamiento de sus trastornos, lo que conllevó una pérdida de credibilidad científica. Sin embargo, incluso los críticos como Dayan y Mainen respaldan por entero los objetivos paralelos del proyecto relativos al desarrollo de herramientas informáticas, integración de datos y creación de modelos matemáticos para la investigación neurológica.

Concentrarse en los macrodatos, una parte fundamental de la estrategia de Markram desde el principio, podría incluso hacer del HBP un complemento perfecto a la iniciativa BRAIN, cuyas nuevas técnicas se espera que generen grandes volúmenes de datos. Si el HBP se reduce a su andamiaje tecnológico y persigue el desarrollo de herramientas informáticas y modelos de investigación neurológica, por mundano que pueda sonar, Henry Markram puede muy bien dejar un legado importante y perdurable a la neurociencia.

EN NUESTRO ARCHIVO

La ofensiva cerebral. Ulrike Gebhardt en *MyC* n.º 65, 2014.
Objetivo: descifrar el cerebro. Alison Abbott en *MyC* n.º 65, 2014.

EVALUACIÓN CIENTÍFICA DE LOS PROGRAMAS CONTRA LA POBREZA

El dinero y las buenas intenciones no bastan para combatir la pobreza. También hacen falta datos que nos revelen qué intervenciones funcionan y cuáles no

DEAN KARLAN

No se puede hacer dinero sin dinero. Esta atractiva expresión, obvia en apariencia, inspiró la idea de los microcréditos, surgida en la década de los noventa del siglo xx para ayudar a las personas a salir de la pobreza. Los bancos no les concedían préstamos tradicionales, pero una cantidad pequeña conllevaría menos riesgos y permitiría a los emprendedores poner en marcha negocios sencillos. El economista Muhammad Yunus y el Banco Grameen de Bangladesh ganaron el premio Nobel de la paz, en 2006, por hallar el modo de aplicar esta novedosa idea.

MARIO WAGNER



Dean Karlan es profesor de economía en la Universidad Yale y presidente y fundador de Innovaciones para la Acción contra la Pobreza, un grupo de investigación sin ánimo de lucro.

El problema es que, si bien los microcréditos presentan aspectos positivos, algunos datos recientes demuestran que, en promedio, no incrementan ni los ingresos ni el consumo doméstico y de alimentos, dos indicadores clave del bienestar económico.

El hecho de que un plan de desarrollo recibiera elogios y abundante financiación durante veinte años sin haber conseguido ayudar a la gente a salir de la pobreza pone de manifiesto la escasez de datos sobre los programas contra esta lacra. Los ciudadanos estadounidenses, por ejemplo, entregan 335.000 millones de dólares anuales a obras de beneficencia; con todo, la mayoría dona por impulso o por recomendación de amigos, no porque cuente con pruebas de que su donativo vaya a tener algún efecto. Las organizaciones filantrópicas suelen entregar dinero a proyectos sin saber en realidad si resultan eficaces.

Por fortuna, vivimos en la época de los macrodatos (*big data*), y las decisiones que solían tomarse por instinto pueden fundamentarse hoy en indicios sólidos. En los últimos años, los sociólogos se valen del análisis de macrodatos en su difícil tarea de averiguar lo que funciona y lo que no. El objetivo es convertir la filantropía en una ciencia, donde el dinero se destine a programas que demuestren su eficacia con pruebas consistentes.

Escuché hablar de los microcréditos en 1992, durante lo que se suponía iba a ser un breve paréntesis en mi carrera de especialista en fondos de cobertura. Tenía 22 años y me fui de prácticas a una de las grandes microfinancieras en El Salvador; allí me llamó la atención lo poco que conocía la organización sobre la repercusión de sus créditos en los clientes (en su mayoría mujeres) y en la economía local.

Se sabía que muchos de los prestatarios regresaban para pedir más créditos y consideraban esta «retención de clientes» como prueba de éxito. ¿Por qué iban a seguir pidiendo préstamos si no era porque les beneficiaban? Sin embargo, los microprestamistas no contaban con pruebas sólidas de que el dinero sirviera a las mujeres para sacar a sus familias de la pobreza. Cuando pregunté si contaban con datos de los resultados de su actividad, me remitieron a un cuestionario superficial. Razoné que la solicitud de préstamos continuados no resultaría positiva a menos que el negocio del cliente estuviera creciendo. El verdadero éxito se lograría si se concediera un solo crédito a quien lo necesitara y más adelante se comprobara que había conseguido la estabilidad suficiente como para no requerir un segundo préstamo.

Sorprendentemente, una organización no gubernamental que recibía cuantiosas subvenciones para asistir a los pobres no llevaba un cálculo real de la efectividad de su trabajo. Cualquier negocio cuenta con indicadores de resultados, pero la mayoría de los donantes no acostumbran a preguntar a las organizaciones benéficas sobre sus logros. A veces se interesan por el porcentaje de los costes operacionales, pero esta suele ser una cantidad insignificante. La pregunta básica, que debe formularse cada vez que alguien entrega un cheque a una organización benéfica o que un Gobierno se compromete con un proyecto de ayuda multimillonario, es si el programa en cuestión va a servir de verdad para aliviar la pobreza. En otras palabras, qué cambio supondrá en la vida de las personas en comparación con el que habrían experimentado de no haberse puesto en marcha el programa.

Ese interrogante me alejó del camino hacia Wall Street y me empujó a estudiar un posgrado en economía. Michael Kremer, uno de mis profesores, había comenzado a realizar ensayos aleatorizados comparativos para averiguar qué programas evitaban el abandono escolar y mejoraban el tipo de educación que recibían los niños. Adoptó el mismo método que la medicina y otras ciencias: tras seleccionar aleatoriamente un número de escuelas, asignó a la mitad de ellas un recurso concreto (el grupo de tratamiento), mientras que el resto permanecía como estaba (el grupo de control); después, comparaba el rendimiento escolar de ambos grupos.

Ese enfoque me inspiró la idea de cómo resolver las cuestiones sobre los microcréditos que en un principio me habían conducido al mundo académico. Cuando presenté el problema y describí un sencillo experimento para abordarlo, pensé que estaba proponiendo un proyecto menor, no una tesis doctoral. Durante dos años había estado leyendo artículos que solían tratar cuestiones empíricas mediante una compleja econometría, por lo que suponía que una tesis debía tener las mismas características. Todavía recuerdo la respuesta de Kremer: «Formula una pregunta importante y no te preocupes de si tu método parece complejo o brillante. Tan solo ocúpate de responderla bien».

Así que me fui a Sudáfrica en mi cuarto año de posgrado a poner en marcha mi primer experimento sobre la eficacia de los microcréditos. Instruí a un equipo en la tarea de buscar personas que quisieran un micropréstamo. Asigné al azar a los seleccionados entre el grupo de tratamiento y el de control y entregué al prestamista la lista del grupo de tratamiento. Este contactaría con ellos y les ofrecería créditos. Parecía bastante sencillo.

No obstante, el proyecto fracasó rotundamente. Siempre que le pasaba la lista al prestamista, este tardaba meses en dar con el posible cliente, y a veces nunca lo encontraba; después se quedó con el miembro más aventajado de mi equipo, y acabó así con mi mejor oportunidad de reunir más sujetos para el proyecto.

A los académicos les resulta difícil llevar a cabo investigaciones en lugares lejanos con el nivel de detalle que requieren los buenos experimentos científicos. Necesitan personal de confianza en el campo que entiendan de ciencia, pero que también posean habilidades sociales para trabajar con compañeros y gestionar las operaciones de campo.

Cuando empecé a trabajar como profesor en 2002, fundé una organización sin ánimo de lucro denominada Innovaciones para la Acción contra la Pobreza con la esperanza de ayudar a cubrir esa falta de pruebas en temas como las finanzas, la educación, la

EN SÍNTESIS

Las organizaciones filantrópicas a menudo entregan dinero a proyectos sin saber en realidad si resultan provechosos.

Los microcréditos, por ejemplo, no logran aumentar el promedio de ingresos de los más pobres del planeta.

Los científicos sociales utilizan los métodos basados en macrodatos para descubrir lo que funciona y lo que no. El objetivo es convertir la filantropía en una ciencia, donde el dinero se destine a programas que aporten pruebas sólidas sobre su eficacia.

Los programas basados en pruebas no son la panacea para la pobreza, pero suponen un gran avance.

alimentación, la paz y la reconstrucción después de un conflicto bélico. La organización pone en contacto a mis inquisitivos colegas del Instituto de Tecnología de Massachusetts, la Universidad Yale y otras instituciones, todos expertos en cálculos numéricos, con más de quinientos trabajadores de 18 países con formación en estudios aleatorizados comparativos. Los más de medio millar de ensayos que llevamos realizados nos han revelado, sobre todo, que las intervenciones sencillas que tienen en cuenta el comportamiento humano obtienen resultados sorprendentes. Colocar dosificadores de cloro justo al lado de las fuentes de agua, para que todos los vean y sirvan de recordatorio, sextuplica el consumo de agua potable. Regalar una sencilla bolsa de lentejas en un campamento de vacunación mensual para familias en la India casi sextuplica las tasas de inmunización en los niños (y abarata todo el proceso, ya que atrae a un mayor número de familias). Y enviar un simple mensaje de texto, a modo de recordatorio, puede ayudar a la gente a lograr sus objetivos, desde ahorrar dinero hasta cumplir con sus regímenes terapéuticos. Desde luego, no todo surte efecto, por lo que debemos averiguar lo que funciona y lo que no.

Además, hemos descubierto que la información es tan solo parte de la solución. Mantener relaciones sólidas con Gobiernos locales, organizaciones sin ánimo de lucro, negocios y bancos permite a los académicos centrarse en las cuestiones importantes y ofrecer soluciones a quienes pueden aplicarlas.

Durante años, mi equipo ha mantenido reservas en cuanto a los microcréditos. Tres lustros después de mi primera tentativa de experimento en Sudáfrica, hemos ejecutado un ensayo aleatorizado sobre créditos al consumo en ese país, y otros siete sobre microcréditos tradicionales. Estos últimos, con diseños de investigación similares, han sido realizados en diferentes puntos del mundo (Bosnia-Herzegovina, Etiopía, India, México, Mongolia, Marruecos y Filipinas) y han sido dirigidos por diversos expertos. Los estudios nos revelaron que los microcréditos proporcionaban algunos beneficios, como ayudar a las familias a capear malas rachas, a pagar sus bienes paulatinamente e incluso a invertir en pequeños negocios. Sin embargo, no demostraron ejercer efecto alguno sobre los principales indicadores de bienestar económico, a saber, los ingresos y los gastos domésticos y de alimentación. Para disgusto de los críticos de los microcréditos, tampoco se descubrieron grandes efectos negativos.

Por tanto, ¿qué es lo que realmente ayuda a aumentar los ingresos de los más pobres del mundo?

En fecha reciente hemos analizado otro programa centrado en algunas deficiencias de los microcréditos. Uno de los tristes fracasos de muchos proyectos (incluidos los de microcréditos) ha sido su incapacidad de llegar a los más pobres de los pobres, conocidos en este campo como los ultrapobres. Viven con alrededor de un euro al día y representan más de mil millones de personas, un séptimo de la población mundial. Lo que les mantiene en la pobreza resulta tan complejo que no hay una solución que funcione por sí sola. Sin embargo, destaca el programa que BRAC, la organización sin ánimo de lucro más grande del mundo, lleva a cabo en Bangladesh y en otros países. Esta entendió la extrema pobreza como un problema complejo que debía ser tratado como tal. Su estrategia de «graduación», diseñada para sacar a los extremadamente pobres de su situación, ofrece un paquete de seis ayudas:

- Un recurso productivo, es decir, un modo de ganarse la vida (ganado, abejas para fabricar miel o suministros para abrir una tienda sencilla).
- Capacitación técnica para aprender a usar el recurso.
- Un pequeño estipendio periódico para cubrir las necesidades diarias inmediatas, con el fin de que la persona no tenga que vender el recurso mientras está aprendiendo a usarlo.
- Acceso a los servicios de salud, para que se mantenga lo suficientemente sana para trabajar.
- Un modo de ahorrar dinero para el futuro.
- Visitas regulares (generalmente semanales) de un preparador para reforzar las habilidades, crear confianza y ayudar a los participantes a lidiar con los problemas que se les presenten.

La Fundación Ford y el Grupo Consultivo para Atender a los Pobres, de Washington D.C., me presentaron la ambiciosa propuesta de analizar un programa de idénticas características que pondrían en marcha diferentes organizaciones en varios países. Elegimos seis lugares: Etiopía, Gana, Honduras, India, Pakistán y Perú. Lo que descubrimos no tenía precedentes: allí donde el programa funcionó, funcionó bien. Cuando regresamos un año después de concluido el proyecto, comprobamos que los resultados habían perdurado, ya que los participantes contaban con más dinero para gastos y comida. Cuando comparamos los costes (de mano de obra, recursos, transporte y operacionales) con los beneficios, calculamos que el rendimiento general había sido positivo en cinco de los seis países; este variaba entre el 133 por ciento en Gana y el 433 por ciento en India. Dicho de otro modo, cada dólar invertido en India se convirtió en 4,33 dólares para gastos y comida en los hogares ultrapobres.

La única excepción fue Honduras, porque el recurso productivo más utilizado por la organización local, los pollos, pertenecían a una raza no autóctona que no resistió las enfermedades locales y murió. Fue un fracaso desde el punto de vista humanitario, pero demostró que el recurso constituye un elemento esencial del programa. Cuando se lo elimina, los otros cinco no generan resultados positivos por sí solos. Como el programa se está ampliando en Etiopía, India y Pakistán, esperamos adquirir nuevos conocimientos para obtener mejores resultados, ya sea reduciendo costes o mejorando los servicios.

No existe una panacea en la lucha contra la pobreza. Ni siquiera un programa dirigido a los extremadamente pobres, como el de graduación (que se está extendiendo y produce un excelente rendimiento por cada dólar donado), va a convertir a los más pobres en familias de clase media propietarias de un coche. Las conclusiones de Innovaciones para la Acción contra la Pobreza son modestas, como no puede ser de otra manera: solo los programas que demuestran eficacia ayudarán a reducir la pobreza. No vamos a erradicarla, pero con los proyectos adecuados haremos grandes progresos.

PARA SABER MÁS

More than good intentions: How a new economics is helping to solve global poverty. Dean Karlan y Jacob Appel. Dutton, 2011.

EN NUESTRO ARCHIVO

Geografía de la pobreza y la riqueza. Jeffrey D. Sachs, Andrew D. Mellinger y John L. Gallup en *IyC*, mayo de 2001.
¿Podrá erradicarse la pobreza extrema? Jeffrey D. Sachs en *IyC*, noviembre de 2005.
Globalización y pobreza. Pranab Bardhan en *IyC*, junio de 2006.



EN SÍNTESIS

Aplicar métodos epidemiológicos en el análisis de datos puede revelar las raíces de la violencia y los mejores pasos para refrenarla. En la ciudad de Cali, la estrategia redujo los homicidios de 124 por 100.000 habitantes a 86 en solo tres años. En Bogotá, la tasa cayó de 80 a 20 en nueve años.

Los cambios en las normativas sobre el uso de armas y la venta de alcohol resultaron cruciales. También el aumento de la presencia policial y la promoción de actividades sociales y puestos de trabajo para los jóvenes.

Hoy, numerosas ciudades americanas celebran con regularidad reuniones de todos los organismos que combaten la delincuencia, con el fin de analizar datos, planificar intervenciones y evaluarlas.

CIENCIA PARA REDUCIR EL CRIMEN

Siguiendo la experiencia de Colombia, dirigentes urbanos de toda América recurren a la ciencia para disminuir las tasas de homicidios

RODRIGO GUERRERO VELASCO

La violencia es un gran problema en la sociedad moderna, sobre todo en las ciudades. Los homicidios estaban fuera de control en mi ciudad, la colombiana Cali, cuando fui elegido su alcalde, en 1992. Pocos veían el asesinato como un problema urgente de salud. Mi opinión era otra, tal vez porque me había doctorado en epidemiología en la Escuela de Salud Pública de Harvard. Para dar con el porqué de los homicidios y descubrir qué cambios sociales y políticos podrían mejorar las cosas, decidí aplicar los métodos estadísticos de los expertos en salud pública.

Cuando empecé mi primer mandato, la gente de Cali y de toda Colombia solía creer, erróneamente, que poco se podía hacer porque nosotros, los colombianos, éramos «genéticamente violentos». Otros escépticos sostenían que el crimen violento no disminuiría a menos que se introdujesen cambios profundos en aspectos socioeconómicos como el desempleo y el nivel educativo. Mi Gobierno municipal demostró que estaban equivocados.

Elaboramos una base de datos epidemiológica que incluía los numerosos factores sociales que hacían aumentar el riesgo de que se produjese un homicidio. Entre ellos figuran rasgos sutiles de la conducta humana, como el deseo de llevar armas en ciertos lugares o la tendencia a beber determinados días. Esta información exhaustiva y detallada permitió desarrollar nuevas leyes y medidas basadas en los datos, no en la política.

El método funcionó. En 1994, en mi ciudad, donde vivían por entonces 1.800.000 personas, los homicidios anuales habían caído, de 124 por 100.000 habitantes a 86 en solo tres años. Un declive aún mayor tras adoptar los mismos métodos tuvo lugar en Bogotá, en nueve años. Y cuando me eligieron alcalde de Cali por segunda vez, a finales de 2011, tras llevar fuera del cargo casi 18 años, el mismo enfoque volvió a disminuir la tasa de homicidios. Voy a contar cómo los macrodatos y el análisis científico pueden contribuir a resolver problemas sociales muy arraigados.

MARIO WAGNER

PRECISAR LAS RAÍCES DEL PROBLEMA

Cuando empecé mi primer mandato, hice lo que los epidemiólogos suelen hacer: marcar los casos en un mapa. Colgué uno bien grande de Cali en la pared de mi despacho y clavé alfileres con colores en cada sitio donde hubiese tenido lugar una muerte, una lesión deliberada, un accidente de tráfico, un robo en una casa o algún otro suceso violento. Cuando un periodista vio el mapa, el periódico local donde trabajaba publicó el siguiente titular: «El alcalde Guerrero pretende frenar la violencia con acupuntura».

Estaba claro que incluso a los periodistas avispados les extrañaba que los homicidios se examinaran desde un punto de vista estadístico. Pero para mí tenía todo el sentido del mundo: si los métodos epidemiológicos podían descubrir las causas de las enfermedades clínicas, también podrían dar con las de una enfermedad social.

Usar estadísticas fue crucial porque Colombia tenía una larga historia de violencia que producía muchas impresiones equívo-

cas. Desde finales de los años cuarenta, La Violencia, una feroz lucha por el poder entre los dos principales partidos políticos, motivó más de 200.000 asesinatos a lo largo de más de diez años. Luego vinieron las guerrillas, que se han prolongado durante decenios. La tolerancia cultural a las reacciones violentas en los conflictos era tal que, cuando tomé posesión, las peleas entre vecinos o conductores tras un accidente de coche solían terminar con alguna muerte. En 1991, Medellín, la segunda ciudad de Colombia, tenía una tasa anual de homicidios de 380 por cien mil. Por entonces, en Chile era de 2,9.

Mi enfoque epidemiológico partía de una definición de violencia de la Organización Mundial de la Salud, a saber, el uso de la fuerza con la intención de causar lesiones o la muerte. Tal definición no incluye los accidentes ni la violencia política o psicológica.

Pese a la preocupación de los medios de comunicación por la guerra en el país, en 1991 las organizaciones guerrilleras solo ocasionaron el 36 por ciento de las muertes en Colombia, la mayoría de ellas en zonas rurales. Imaginé que los traficantes de droga serían los culpables del otro 64 por ciento. Sin embargo, cuando investigamos el quién, dónde y cuándo de cada muerte en Cali, observamos que los homicidas y sus víctimas eran sobre todo varones jóvenes y sin empleo, con un bajo nivel educativo; procedían de los sectores más pobres de la ciudad y a menudo participaban en peleas de bandas. Descubrimos también que cerca del 80 por ciento de los homicidios se habían perpetrado con armas de fuego. Al comprobar que dos tercios de los asesinatos ocurrían los fines de semana, decidimos registrar los niveles de alcohol en la sangre de las víctimas; más de la mitad estaban ebrios. Los datos apuntaban más a una desintegración social que a la violencia relacionada con las drogas.

El narcotráfico también contaba, pero no era la causa directa de la mayoría de los homicidios. Al analizar los números, comprendimos que el tráfico de drogas era para la sociedad lo que el VIH para el cuerpo humano: el virus ataca los mecanismos de defensa del organismo y este se vuelve vulnerable a otras enfermedades. De manera semejante, los traficantes arremeten contra la policía y los sistemas judicial y político, los mecanismos de defensa de la sociedad. Esas instituciones debilitadas se convierten en factores de riesgo de la violencia. De este modo, la policía identificaba sospechosos en solo un 6 por ciento de los homicidios y el sistema judicial llevaba a juicio aún a menos.

Además, los niños solían hallarse expuestos a la violencia y los malos tratos, y en los medios de comunicación aparecían con frecuencia contenidos violentos. En una cultura de violencia, desigualdad económica y seguridad pública ineficaz, las personas mataban y eran matadas, a menudo bajo la influencia del alcohol, por conflictos tan simples como unos vecinos ruidosos o unas deudas sin zanjar.

CAMBIAR LA CULTURA

Nuestro objetivo consistía en determinar los factores de riesgo sobre los que pudiésemos actuar directamente. Como las armas de fuego se usaban en una gran parte de los homicidios y el alcohol solía estar asociado con ellos, en noviembre de 1993 me propuse cambiar las normas sobre las pistolas y el alcohol.

En mi país, las pistolas las fabrica y vende el ejército nacional, así que las autoridades militares se opusieron a la idea de una suspensión permanente de los permisos de armas. Pero aceptaron que se suspendiesen en lugares públicos en fechas de alto riesgo en las que se daba un consumo elevado de alcohol. Entre esas fechas figuraban Nochevieja y, aunque parezca extraño, el Día de la Madre, así como los días en que se les entregaba la paga a los empleados (en Colombia, el 15 y el 30 de cada mes) y que caían en viernes.

Restringí además la venta de alcohol en lugares públicos pasadas las dos de la madrugada, medida a la que mi Gobierno municipal llamó «ley semiseca». Los dueños de las salas de fiesta protestaron férreamente, así que les propuse un trato: la aplicaría durante tres meses, y si las muertes violentas y las lesiones no disminuían, prescindiría de ella. Pasadas solo dos semanas, los hospitales informaron de una reducción tan grande de las emergencias relacionadas con la violencia que ya no cabía optar por abandonar la medida. La mantuve en vigor durante todo mi mandato.

Una estrategia epidemiológica exige también que se evalúen las intervenciones. Varios meses después, vimos que, cuando se restringían a la vez la venta de alcohol y los permisos de armas de fuego, los homicidios disminuían un 35 por ciento con respecto a los días sin ninguna de esas restricciones. Y se reducían un 14 por ciento cuando solo se limitaban las armas.

Otras intervenciones consistieron en nombrar más fiscales y poner más policías en las calles y mejorar su equipamiento (cámaras de vigilancia, coches, radios). Para apoyar a estas personas en su difícil profesión creamos un programa, costeado con fondos privados, que ayudaba a los agentes a adquirir una vivienda, mientras que a los miembros del sistema judicial les ofrecimos ordenadores y formación. Como consecuencia, se evitaron más crímenes y se llevó a más sospechosos a juicio.

Creamos, además, dos Casas de la Justicia en barrios violentos de la periferia de Cali, centros donde las instituciones que velan por el cumplimiento de la ley actuaban las 24 horas del día. Antes, esos servicios solo funcionaban en horario laboral en el centro de la ciudad. Este cambio contribuyó especialmente a reducir la violencia doméstica, porque con él las investigaciones empezaban justo después de que el personal médico forense certificase las lesiones que había sufrido la víctima; de ese modo era más difícil que las presiones de los maridos llevasen a las mujeres a retirar la denuncia. Con el propósito de ofrecer a los hombres jóvenes de los distritos pobres mayores oportunidades de educarse, entretenerse, conseguir ingresos y relacionarse socialmente, creé el programa DESEPAZ (Desarrollo, Seguridad y Paz), encaminado a restaurar la seguridad pública al promover la cohesión de los barrios. Abrí «casas de la juventud» en varios barrios; en ellas las personas podían socializarse y reunirse en torno a actividades culturales y deportivas. Empleados municipales enseñaron también a jóvenes implicados en bandas a

Rodrigo Guerrero Velasco es alcalde de Cali para el período 2012-2015, y ya lo fue entre 1992 y 1994. Tras su primer mandato, trabajó para la Organización Panamericana de la Salud y contribuyó a fundar VallenPaz con el objetivo de crear programas económicos en la Colombia rural, donde cunden las guerrillas y los cultivos para la producción de drogas.



llevar pequeños negocios. La ciudad incluso contrató uno de esos negocios, que se dedicaba a fabricar adoquines para pavimentar las calles.

MEJORA DE LOS DATOS

Enseguida nos dimos cuenta de que los datos con que trabajábamos no siempre eran coherentes. En mi primera reunión del consejo municipal de seguridad, en julio de 1992, quedó claro que la policía y el sistema judicial usaban definiciones diferentes de *homicidio*, lo que complicaba nuestro empeño de precisar las causas de las muertes. Para enmendar el problema, establecí que se celebrasen reuniones semanales sobre seguridad en las que participarían responsables de la policía, autoridades judiciales y forenses, miembros del Instituto de Investigación y Desarrollo en Prevención de la Violencia y Promoción de la Coexistencia Social (CISALVA), en la Universidad del Valle, miembros del gabinete encargados de la seguridad pública, y la agencia municipal de estadísticas. La información se me comunicaba semanalmente a mí y a los jefes de policía. Celebramos una reunión del consejo de seguridad cada semana de mi mandato. Poco a poco, los datos fueron casando. Las reuniones se convirtieron en «observatorios del crimen», llamados también «observatorios sociales». CISALVA, que se dedica a estudiar la prevención de la violencia, lleva 22 años encargándose de los datos del observatorio; hasta donde sé, es el conjunto de información fiable sobre la violencia más prolongado con el que cuenta una ciudad colombiana.

Sobre la base del análisis mejorado de los factores de riesgo, empezamos las intervenciones a finales de 1993 y las ampliamos antes de que mi mandato de dos años y medio terminase, en diciembre de 1994. Mi sucesor las continuó. La tasa de homicidios cayó en Cali de 124 por 100.000 en 1994 a 112 en 1995, 100 en 1996 y 86 en 1997. Cuesta decir qué parte de ese descenso se produjo como consecuencia directa de las intervenciones, porque el Gobierno nacional también estaba cambiando la manera en que la policía combatía los cárteles de la droga. Pero las evaluaciones efectuadas en Cali y en Bogotá confirmaron que el enfoque epidemiológico había desempeñado un papel relevante. Creo que fue así, entre otras razones, porque los alcaldes que vinieron después de mi sucesor no mantuvieron medidas impopulares como la restricción del consumo de alcohol, y la tasa de homicidios subió de nuevo.

La experiencia de Bogotá, la mayor ciudad del país, respalda el método basado en los macrodatos. Cuando Antanas Mockus fue elegido allí alcalde en enero de 1995, aplicó y perfeccionó nuestra estrategia. Multiplicó el presupuesto de la policía por diez, mejoró la educación de esta con respecto al crimen violento, abrió centros de detención temporal para los infractores de delitos menores y creó una subsecretaría de prevención de la violencia. También aplicó medidas sociales como reconstruir los espacios públicos deteriorados y triplicar las inversiones en salud y educación.

Mockus decretó, asimismo, una ley semiseca y restricciones sobre las armas de fuego, que enseguida redujeron las tasas de homicidio tanto como en Cali. En Bogotá, el uso estricto del método epidemiológico abarcó tres Gobiernos municipales durante nueve años, de 1995 a 2003. Durante ese tiempo, los homicidios cayeron de 59 a 25 por 100.000. Como en Cali, parte de la mejora quizá se debiera a los cambios realizados a escala nacional.

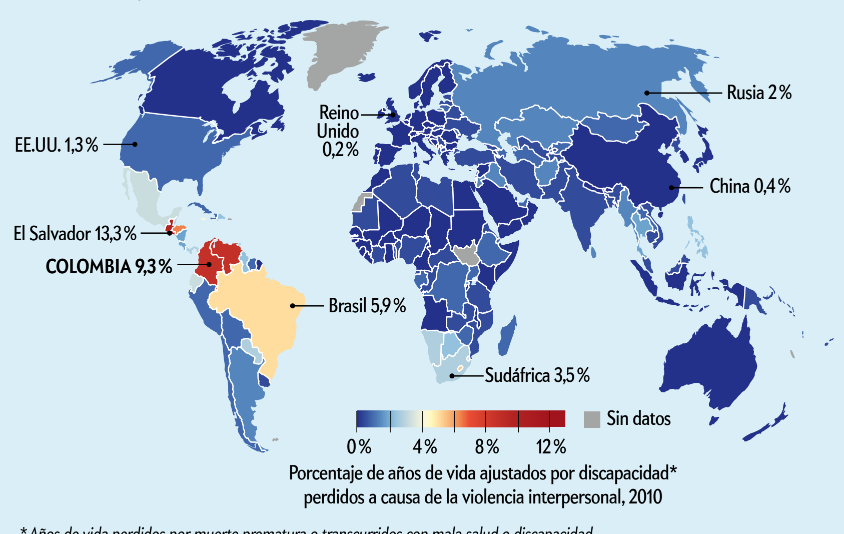
LAS NUEVAS TÁCTICAS, VEINTE AÑOS DESPUÉS

En Colombia, un mismo alcalde no puede ser elegido dos veces consecutivas; en cualquier caso, yo tenía otros planes. Tras dejar el cargo, me dediqué a difundir la nueva de que la violencia urbana se podía controlar y a realizar más investigaciones al respecto. Entré a trabajar en la Organización Panamericana de la Salud, en Washington, D.C., participé en las actuaciones que crearían la Coalición Interamericana para la Prevención de la Violencia, y contribuí a reunir apoyos para que el Banco Interamericano de Desarrollo concediese a Cali, Medellín y Bogotá un crédito para la prevención de la violencia. Pasados tres años, volví a Cali y ayudé a crear VallenPaz, organización dedicada a la implantación de programas económicos en las zonas rurales del sudoeste de Colombia, como alternativa al cebo del dinero de las guerrillas y de los cultivos ilegales de droga.

Años después, sin embargo, comprobé que no hay una inmunización contra la política que dure toda la vida. Me presenté de nuevo como candidato a alcalde de Cali.

Cuando tomé posesión del cargo el 1 de enero de 2012, me encontré con una ciudad diferente. Había pasado de 1.800.000 habitantes en 1994 a 2.400.000. En su mayor parte, esa población

LAS NACIONES MÁS VIOLENTAS: Centroamérica y Sudamérica encabezan las listas de muerte prematura o incapacidad causadas por la violencia entre individuos, como las producidas por armas blancas o de fuego. En la mayoría de los países del mundo, se pierden por esa causa menos del 3 por ciento de años de vida potencial ajustados por discapacidad (*azul oscuro y claro*), pero en algunas partes de América las cifras son mayores, como en Colombia (9,3 por ciento) y El Salvador (13,3 por ciento). Las intervenciones basadas en datos orientadas a reducir la violencia en las ciudades están teniendo éxito en Colombia y se empiezan a aplicar en otros sitios.



Años de vida perdidos por muerte prematura o transcurridos con mala salud o discapacidad.

FUENTE: INTERCAMBIO MUNDIAL DE DATOS SOBRE LA SALUD, INSTITUTO PARA LA MEDICIÓN Y EVALUACIÓN DE LA SALUD, UNIVERSIDAD DE WASHINGTON; TERRA CARTA (*mapa*)

adicional estaba formada por inmigrantes, procedentes sobre todo de la costa colombiana del Pacífico y de las zonas rurales cercanas. Tras años de Gobiernos municipales incompetentes y un alcalde expulsado del cargo, la autoestima colectiva era baja y el desempleo había subido de un 6,9 a un 13 por ciento en 2013. Los grandes cárteles de la droga, aunque desmantelados en los años noventa, se hallaban ahora fragmentados en cárteles más pequeños que actuaban con bastante independencia en las ciudades de la nación, en particular en Medellín y Cali. Todavía se traficaba con drogas y habían nacido nuevas formas de crimen, como los pequeños pagos conocidos como «vacunas» que las bandas exigen a cambio de protección a los negocios locales, así como las guerras por el control territorial de la distribución y venta de droga en las ciudades.

La buena noticia era que la policía colombiana se había vuelto profesional y digna de confianza. La tasa nacional de homicidios había descendido de un 79 por 100.000 en 1991 a un 36 en 2011. Sin embargo, la de Cali era alrededor de 80, mientras que en Bogotá era del 22 y en Medellín, del 70.

Restauré de inmediato las reuniones semanales del consejo de seguridad. Pronto, nuestros análisis de los datos arrojaron que la proporción de homicidios causados por conflictos interpersonales, como las trifulcas relacionadas con el alcohol y las riñas, había disminuido en comparación con el período entre 1992 y 1994. Pero los asesinatos que estaban clasificados dentro del crimen organizado comprendían en 2012 el 67 por ciento de las muertes violentas. Los datos daban a entender que el crimen organizado había ganado terreno. Mostraban, además, que las desigualdades sociales habían empeorado desde mi primer mandato.

Presentamos nuestros datos al Gobierno nacional y le sugerimos que crease grupos especializados de investigadores, policías y fiscales contra el crimen. Mi Gobierno municipal puso en marcha, asimismo, un gran plan de inversiones sociales en once distritos donde vivían 800.000 personas, el 26 por ciento de las cuales lo hacían en la pobreza y otro 6,5, en la pobreza extrema.

El plan resultante, denominado Territorios de Inclusión y Oportunidades, aún sigue hoy en vigor. Aplica un enfoque geográfico para combatir la pobreza; concentra las intervenciones en zonas desfavorecidas y anima a los que residen en ellas a cumplir funciones importantes. Responsables locales y nacionales trabajan en subir los ingresos económicos, extender los horarios escolares, promover actividades culturales y deportivas, y mejorar la vivienda, las instalaciones sanitarias y la educación pública. Además, enseñamos habilidades parentales y la resolución pacífica de conflictos.

Nuestras intervenciones, unidas al empeño del Gobierno nacional de combatir el crimen organizado, redujeron de nuevo la violencia. Un buen ejemplo de la estrategia seguida es Comuna 6, un distrito político de Cali donde viven 212.000 personas, en su mayor parte con ingresos medios. Aplicamos enérgicamente las intervenciones policiales y sociales, y los homicidios se redujeron un 44 por ciento en un año, de 160 en 2013 a 89 en 2014.

El método epidemiológico para reducir la violencia se está mostrando eficaz en otras ciudades de Colombia y en toda América. Los observatorios del crimen (semejantes a nuestras reuniones regulares del consejo de seguridad) resultan esenciales para tal enfoque. El Banco Interamericano de Desarrollo, la Agencia de Desarrollo Internacional de Estados Unidos y el Banco Mundial, entre otros organismos, recomiendan ahora a las ciudades o Estados que buscan respaldo económico para prevenir la violencia que creen los observatorios. Actualmente, se reúnen con regularidad cuatro observatorios nacionales y numerosos municipales en 26 países y ciudades americanas.

Según un estudio publicado en *Internacional Journal of Injury Control and Safety Promotion,* los homicidios se redujeron de modo notable en 22 ciudades colombianas en el período de tres años posterior a la instauración de los observatorios. Sin embargo, es difícil realizar estudios que comparen directamente ciudades de diferentes naciones, ya que las definiciones de los crímenes y los criterios que se siguen al recopilar la información varían de un país a otro. Para mejorar la situación, el Banco Interamericano de Desarrollo apoya un proyecto con el fin de normalizar los indicadores de la violencia en toda América.

LA VOLUNTAD POLÍTICA, LA MAYOR PRIORIDAD

Uno podría pensar que valerse de una estrategia epidemiológica para solucionar un problema social resulta fácil, pero no es así. La primera lección que he aprendido es que dar ese paso exige una fuerte voluntad política, porque suele obligar a los responsables públicos a tomar decisiones impopulares, entre ellas cerrar los bares o prohibir las armas de fuego. Publicar los datos concernientes a los crímenes también puede resultar incómodo, pero es esencial, como lo es que los economistas informen sobre las cifras del paro y del producto interior bruto para formular una estrategia económica. Ahora, grupos sin ánimo de lucro (denominados Bogotá Cómo Vamos, Cali Cómo Vamos, etc.) están publicando periódicamente datos de varias ciudades colombianas sobre cuestiones sociales, como la violencia o la educación. La información hace que los responsables públicos y los alcaldes tengan que responder ante sus comunidades.

La segunda lección es que no hay un enfoque único para la aplicación de los métodos epidemiológicos a los problemas sociales, ya que las ciudades y los países presentan factores de riesgo diferentes. Para guiar a los responsables públicos se necesita en cada contexto la observación basada en los datos.

El proceso exige, además, perseverancia y paciencia. Ciertos factores de riesgo pueden modificarse enseguida, como la prohibición de las armas de fuego o la reducción del horario de apertura de los bares, pero otras medidas, como aumentar el alcance de la policía y los servicios judiciales, llevan más tiempo. Corregir las desigualdades sociales o establecer maneras sanas de educar a los niños no solo requieren tiempo y paciencia, sino también unos medios considerables.

La violencia urbana resulta socialmente regresiva porque afecta sobre todo a los pobres y porque luchar contra el crimen consume una parte del presupuesto público, que de lo contrario podría dedicarse a erradicar la pobreza. La prevención de la violencia debe ser, pues, una prioridad de la humanidad.

PARA SABER MÁS

The evaluation of a surveillance system for violent and non-intentional injury mortality in Colombian cities. María Isabel Gutiérrez-Martínez et al. en *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*, vol. 14, n.º 2, págs. 77-84, 2007.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los cimientos de la violencia. Amalio Blanco en *MyC* n.º 49, 2011.

por Julio Parapar, María Capa y Pat Hutchings

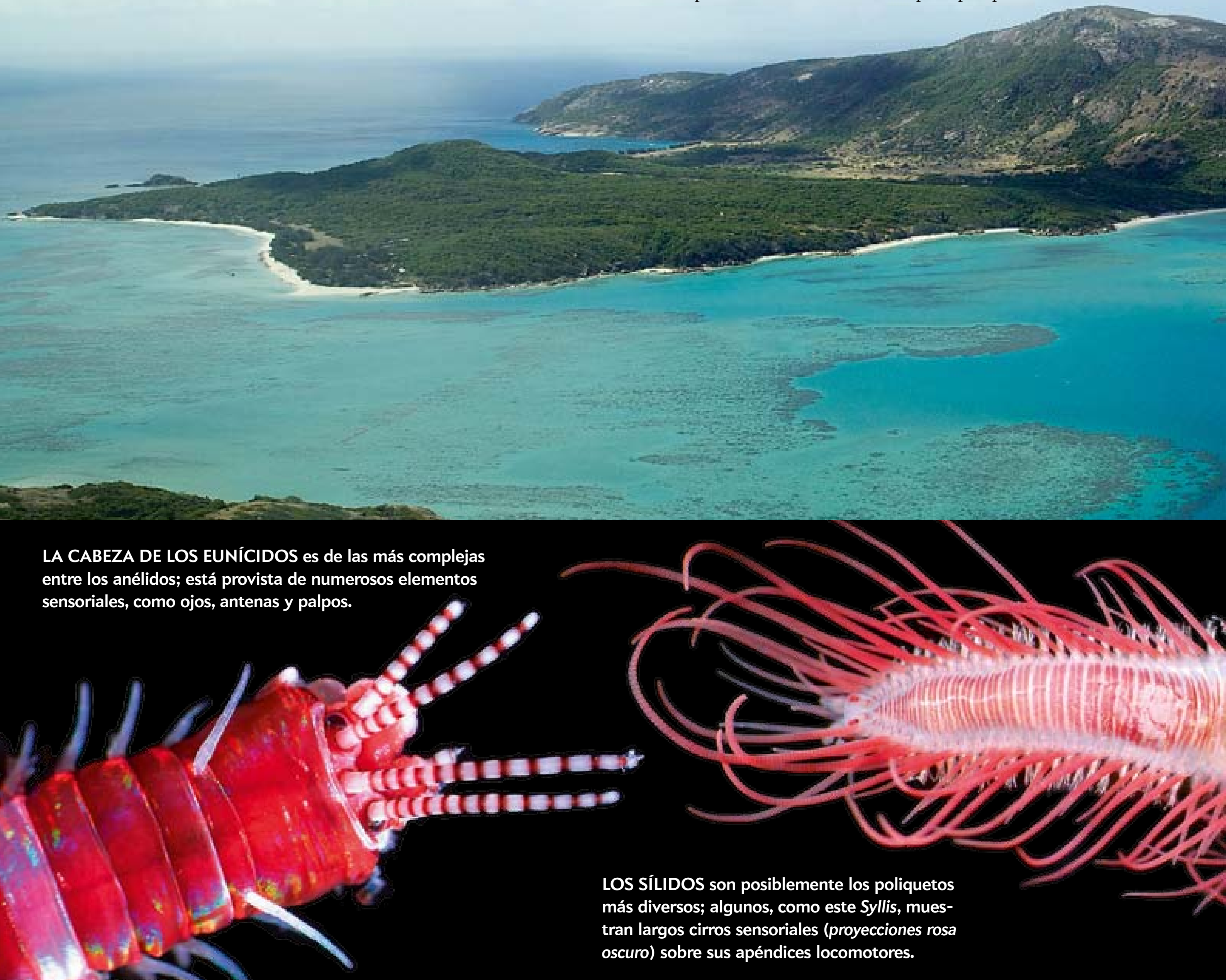
Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

La familia numerosa de los anélidos coralinos

Una expedición a la Gran Barrera de Coral revela 91 especies nuevas de gusanos marinos

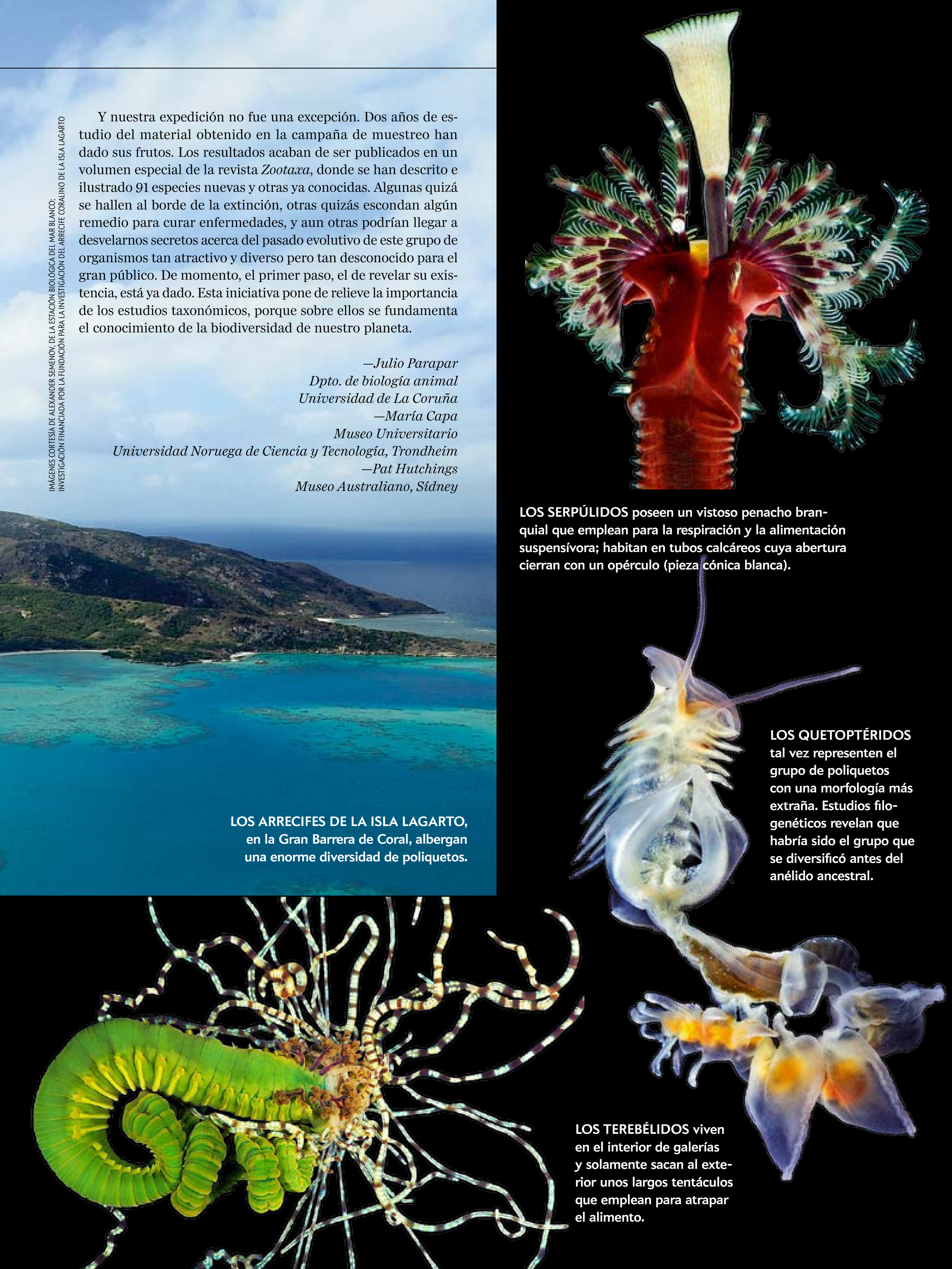
El océano es un universo donde aún queda mucho por explorar. Regiones emblemáticas y aparentemente bien conocidas como la Gran Barrera de Coral, en Australia, esconden todavía sorpresas bajo sus aguas. En agosto de 2013, un grupo internacional formado por quince expertos en poliquetos marinos (un tipo de anélidos) visitamos durante dos semanas el archipiélago de la isla Lagarto, en plena barrera arrecifal, con el objetivo de catalogar y describir la diversidad de especies que habitan en sus fondos.

Los anélidos conforman un grupo de invertebrados vermiformes que ha colonizado de un modo muy exitoso gran parte de los ambientes de nuestro planeta. Son extremadamente abundantes en el lecho marino, de ahí que se puedan hallar en cualquier océano y a cualquier profundidad, donde presentan una increíble variedad de morfologías, modos de vida y estrategias alimentarias y reproductoras. En la actualidad existen más de 17.000 especies descritas, pero su número sigue creciendo tras cada expedición científica en zonas poco prospectadas.



LA CABEZA DE LOS EUNÍCIDOS es de las más complejas entre los anélidos; está provista de numerosos elementos sensoriales, como ojos, antenas y palpos.

LOS SÍLIDOS son posiblemente los poliquetos más diversos; algunos, como este *Syllis*, muestran largos cirros sensoriales (*proyecciones rosa oscuro*) sobre sus apéndices locomotores.



Y nuestra expedición no fue una excepción. Dos años de estudio del material obtenido en la campaña de muestreo han dado sus frutos. Los resultados acaban de ser publicados en un volumen especial de la revista *Zootaxa*, donde se han descrito e ilustrado 91 especies nuevas y otras ya conocidas. Algunas quizá se hallen al borde de la extinción, otras quizás escondan algún remedio para curar enfermedades, y aun otras podrían llegar a desvelarnos secretos acerca del pasado evolutivo de este grupo de organismos tan atractivo y diverso pero tan desconocido para el gran público. De momento, el primer paso, el de revelar su existencia, está ya dado. Esta iniciativa pone de relieve la importancia de los estudios taxonómicos, porque sobre ellos se fundamenta el conocimiento de la biodiversidad de nuestro planeta.

—Julio Parapar
Dpto. de biología animal
Universidad de La Coruña
—María Capa
Museo Universitario
Universidad Noruega de Ciencia y Tecnología, Trondheim
—Pat Hutchings
Museo Australiano, Sídney

IMÁGENES CORTESÍA DE ALEXANDER SEMENOV, DE LA ESTACIÓN BIOLÓGICA DEL MAR BLANCO; INVESTIGACIÓN FINANCIADA POR LA FUNDACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN DEL ARRECIFE CORALINO DE LA ISLA LAGARTO

LOS SERPÚLIDOS poseen un vistoso penacho branquial que emplean para la respiración y la alimentación suspensívora; habitan en tubos calcáreos cuya abertura cierran con un opérculo (pieza cónica blanca).

LOS ARRECIFES DE LA ISLA LAGARTO, en la Gran Barrera de Coral, albergan una enorme diversidad de poliquetos.

LOS QUETOPTÉRIDOS tal vez representen el grupo de poliquetos con una morfología más extraña. Estudios filogenéticos revelan que habría sido el grupo que se diversificó antes del anélido ancestral.

LOS TEREBÉLIDOS viven en el interior de galerías y solamente sacan al exterior unos largos tentáculos que emplean para atrapar el alimento.

por Richard Staley



Richard Staley, experto en historia de la física, es profesor en el departamento de historia y filosofía de la ciencia de la Universidad de Cambridge.

Tomar el pulso a la luz

Los experimentos de Albert Michelson con espejos y tuercas

Despedimos el Año Internacional de la Luz recordando los trabajos del físico estadounidense Albert Michelson. Nadie hizo más que él por tomarle el pulso a la luz. Primero midió su velocidad mediante un espejo rotatorio. Luego intentó detectar el éter, el medio en que se movía la luz, disponiendo una serie de espejos sobre una superficie que giraba lentamente. Por último, promovió el interferómetro, un nuevo instrumento capaz de medir diámetros estelares, aumentar la resolución de las líneas espectrales y fijar un nuevo estándar de longitud basado en la longitud de onda de la luz.

Se considera a Michelson un científico singular, cuyas mediciones cada vez más precisas de la velocidad de la luz cuestionaron la existencia del éter y allanaron el camino de la relatividad. Pero dominar la luz hasta ese extremo requirió conjugar dos características distintivas de Estados Unidos: una densa red de observatorios astronómicos y una comunidad de hábiles constructores de herramientas al servicio de la industria. Michelson innovó usando los componentes disponibles y basándose en diseños simples, pero su investigación respondía a las contribuciones de mentores y rivales a un lado y otro del Atlántico. Simon Newcomb y Henry Rowland en EE.UU., y Alfred Cornu y lord Rayleigh en Francia y Gran Bretaña, respectivamente, fueron muy relevantes para él —las mediciones de la velocidad de la luz de Michelson eran, pues, menos singulares de lo que se suele suponer—. Además, sus investigaciones interferométricas retaron a los mejores espectroscopios del momento, que no alcanzarían la precisión necesaria hasta una década después. Comprender las formas en que Michelson tomó el pulso a la luz nos ayuda a entender la historia de los lugares en los que vivió y trabajó, el funcionamiento de las comunidades científicas y qué significa replicar un experimento.

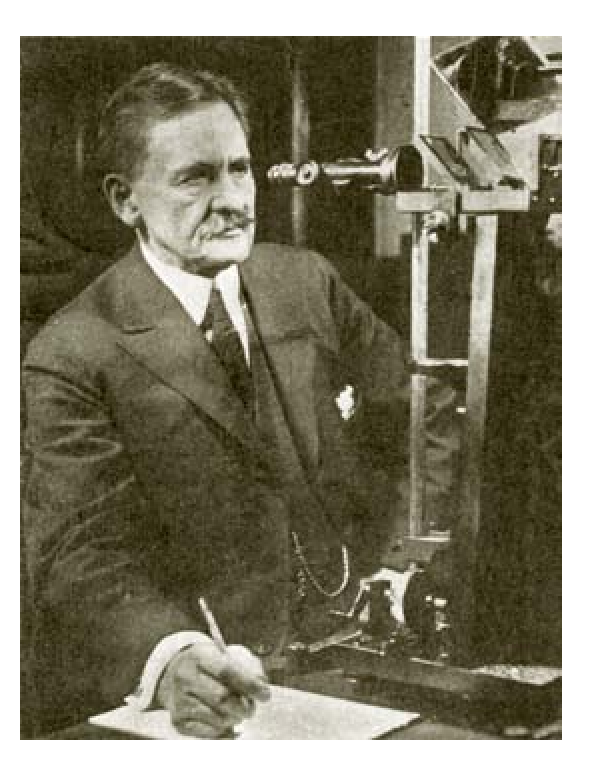
La velocidad: Girar un espejo

Como profesor de física en la Academia Naval estadounidense en Annapolis, Michelson decidió medir la velocidad de la luz combinando los mejores elementos de dos experimentos previos: un espejo giratorio (como Léon Foucault) y un recorrido largo (como Cornu). Partiendo de un espejo semitransparente, un rayo de luz iba a recorrer en ambos sentidos una distancia lo bastante larga como para determinar el tiempo empleado en recorrerla; entretanto, el espejo habría girado, de modo que a su vuelta el rayo de luz sería reflejado en otra dirección. Sirviéndose de una escala fabricada por William Rogers, astrónomo experto en medidas de longitud, y de los mejores instrumentos que pudieron facilitarle constructores como Alvan Clark and Sons, en 1879 Michelson obtuvo un nuevo valor para la velocidad de la luz.

Su ingenio impresionó a Newcomb, director de la Oficina del Almanaque Náutico y profesor del Observatorio Naval, quien iba a realizar su propio experimento y publicar sus resultados en 1882. Si bien destacamos retrospectivamente las mediciones de Michelson, en su momento se consideró que las de Newcomb, más elaboradas, eran más fiables, y Cornu siguió prefiriendo su propio resultado. Estos trabajos fijaron a través de mediciones terrestres una constante fundamental para los cálculos astronómicos, constante que había sido determinada también mediante la observación del tránsito de Venus. Era la primera vez que Michelson orientaba su trabajo hacia la astronomía, una disciplina ya asentada en Estados Unidos.

El medio: Girar una mesa

Michelson obtuvo permiso de la Armada para viajar a Gran Bretaña, Francia y Alemania y trabajar con algunos de los mejores físicos del momento. Durante su estancia en Europa ideó un método para establecer de qué modo el movimiento de la Tierra a través del éter, supuestamente estacionario, afectaba a la velocidad de la luz. En 1881 aprovechó las condiciones estables del sótano del observatorio de Potsdam, Berlín, para probar un dispositivo muy sensible basado en el trabajo de los físicos franceses. Dos rayos de luz procedentes de una misma fuente viajaban en direcciones dis-



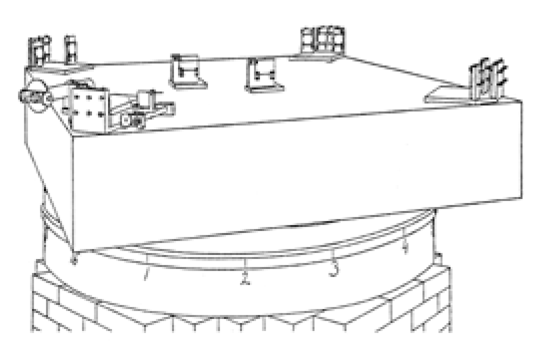
ALBERT MICHELSON en el laboratorio de la Universidad de Chicago que dirigió entre 1894 y 1928, fotografiado con uno de los muchos interferómetros que usó a lo largo de su carrera.

tintas y eran reflejados. Michelson pretendía observar las franjas de interferencia que se producían al recombinarse a su vuelta. El rayo que había viajado en dirección este-oeste, a favor y en contra del movimiento orbital de la Tierra, debería recorrer la misma distancia en un tiempo inferior al del rayo que había viajado en dirección norte-sur. Mediante un espejo semiplateado, envió dos rayos en direcciones perpendiculares. Esperaba que las franjas de interferencia variaran a medida que el dispositivo giraba sobre sí mismo, cambiando su orientación respecto a la órbita terrestre. Para su sorpresa, no detectó sino pequeños cambios en las franjas, lo que le enseñó más sobre la fragilidad del instrumento que sobre cualquier viento del éter. Necesitaba que la rotación fuera más suave y la distancia recorrida por la luz más larga.

Años después, en 1887, tras su regreso a Estados Unidos como profesor de física en la Escuela de Ciencia Aplicada Case, en Cleveland, Michelson colaboró con Edward Morley en un nuevo experimento sobre el arrastre del éter. La luz de una lámpara de sodio recorría, gracias a 16 espejos, un largo camino de ida y vuelta sobre una plataforma de piedra que descansaba en un baño de mercurio, lo que le permitía girar suavemente. El resultado fue de nuevo negativo, pero Michelson no dudó de la existencia del éter. Con el tiempo, otros físicos mostrarían que las medidas de espacio y tiempo en sistemas de referencia en movimiento dependen de las señales lumínicas necesarias para efectuar dichas medidas. Hendrik A. Lorentz, Henri Poincaré y, sobre todo, Albert Einstein reconocieron que la luz relacionaba inextricablemente espacio y tiempo. Einstein, además, declararía al éter óptico superfluo.

La longitud de onda: Una vuelta de tuerca y los límites de una línea

La preocupación primordial de Michelson era otra. Quería usar los fenómenos de interferencia como un detector extremadamente sensible perteneciente a la familia de lo que más tarde se conocería como interferómetros. Mediante una serie de espejos estacionarios casi idéntica a la de su primer experimento sobre el éter, girando lentamente la tuerca de husillo fijada a uno de ellos mientras miraba a través de una lente, Michelson podía observar las franjas de interferencia. Su objetivo era obtener un estándar natural de longitud. Pero descubrió que las franjas de muchas líneas espectrales tenían una intensidad variable, lo que revelaba una estructura fina hasta entonces desconocida. En Sèvres, en 1892, Michelson midió el Metro Internacional en términos de la longitud de onda de tres líneas del espectro del cadmio. Sin embargo, sus valores para el espectro del cadmio diferían de los obtenidos mediante las redes de difracción de Rowland, una discrepancia que preocupaba a la comunidad de espectroscopistas. Las líneas espectrales eran la firma de los elementos, proporcionaban información sobre su estructura atómica y sobre la composición del Sol y las estrellas. ¿Era fiable el nuevo instrumento de Michelson?



APARATO con el que Michelson y Morley repitieron en 1887 el experimento de Michelson de 1881 sobre el arrastre del éter.

FUENTE: «ON THE RELATIVE MOTION OF THE EARTH AND THE LUMINIFEROUS ETHER», POR ALBERT A. MICHELSON Y THOMAS MORLEY EN *AMERICAN JOURNAL OF SCIENCE*, VOL. 34, PÁGS. 333-345, 1887.

La repetición de un experimento raramente constituye una réplica exacta. La interpretación teórica y la valoración de los instrumentos están llenas de sutilezas. Se requiere mucha experiencia y habilidad para decidir cuándo conviene repetir un experimento y cuándo modificarlo, o qué valor asignar a una constante medida con técnicas distintas.

Michelson repitió tres veces sus experimentos sobre la velocidad de la luz. La primera en 1883, a lo largo de una línea de ferrocarril; la segunda, en los años 1920, a través de una distancia mucho más larga entre dos cimas en California, y, por último, en 1931, a lo largo de una conducción subterránea en la que se había hecho el vacío. El arrastre del éter era otra cosa. Tras perder su interés por la cuestión, solo volvió sobre ella en 1887, siguiendo el consejo de Rayleigh. Al publicar sus resultados sobre el arrastre del éter sin haber realizado las observaciones en diferentes momentos del año, Michelson y Morley mostraron su confianza en los resultados, así como el interés de Michelson por la interferometría. Cuando creció el interés teórico por sus implicaciones, Michelson, Morley y Dayton Miller modificaron sus experimentos.

La repetición más importante del trabajo de Michelson la hicieron Charles Fabry y Alfred Pérot, dos físicos franceses que comprobaron la medida del metro mediante un nuevo dispositivo interferométrico. La confirmación del resultado de Michelson consolidó la significación espectroscópica de la interferometría y brindó a Michelson el Nobel de física de 1907. Fue un paso más en el largo proceso de incorporación de la interferometría a la medición científica y la mecánica práctica, a través de las medidas industriales de precisión y el control de procesos de fabricación.

Al medir la velocidad de la luz, analizar su medio de propagación y usarla como vara de medida y firma de los elementos, Michelson reveló nuevas conexiones entre la luz y la mecánica. Es probable que esto fuera tan difícil de conseguir en la práctica experimental como lo fuera para Einstein revelarlas en el plano teórico.

PARA SABER MÁS

Experimental determination of the velocity of light. A. A. Michelson en *Proceedings of the American Association for the Advancement of Science*, vol. 28, págs. 124-160, 1879.

On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether. A. A. Michelson y E. W. Morley en *American Journal of Science*, vol. 34, págs. 333-345, 1887.

On a method of making the wave length of sodium light the actual and practical standard of length. A. A. Michelson y E. W. Morley en *American Journal of Science*, vol. 34, págs. 427-430, 1887.

The master of light: A biography of Albert A. Michelson. Dorothy M. Livingston. Charles Scribner's Sons, Nueva York, 1973.

Einstein's generation: The origins of the relativity revolution. Richard Staley. University of Chicago Press, Chicago, 2008.

Michelson and the Observatory: Physics and the astronomical community in nineteenth century America en *The heavens on Earth: Observatory techniques in nineteenth-century science*. Dirigido por David Aubin, Charlotte Bigg y H. Otto Sibum. Duke University Press, Durham, NC/London, 2010.

EN NUESTRO ARCHIVO

Un aficionado realiza una versión del aparato de A. A. Michelson para la medición de la velocidad de la luz. C. L. Stong en *IyC*, septiembre de 2001.

por Michael E. Mann

Michael E. Mann es profesor de meteorología en la Universidad de Pensilvania. Participó en el proyecto del Grupo Internacional de Expertos sobre el Cambio Climático que recibió el premio Nobel de la paz en 2007.



Difícil, pero no imposible

Todavía estamos a tiempo de evitar un calentamiento global peligroso

Muy cuesta arriba se le hace al mundo evitar que la superficie de la Tierra se caliente más de 2 ºC, pero si superamos este límite dañaremos gravemente el planeta. Es la cifra que motiva el compromiso de reducir las emisiones de gases de invernadero que muchas naciones adoptarán en la Conferencia del Cambio Climático de 2015, convocada por las Naciones Unidas. Se estará celebrando en París cuando esta revista salga a la calle.

Sin embargo, algunos, con intención crítica, sostienen que el llamado objetivo de los dos grados es imposible; según ellos, no da tiempo a implantar la tecnología necesaria para descarbonizar la economía [*véase* «Es hora de abandonar el objetivo de los 2 ºC», por D. G. Victor y C. F. Kennel; Investigación y Ciencia, marzo de 2015]. Pero sí da tiempo. El obstáculo no es físico, sino político y social.

Nadie dice que sea fácil. Más de setenta asesores de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático sostienen que limitar el calentamiento global a menos de dos grados «requiere una transición radical [...] no un mero ajuste de las tendencias actuales».

Solo podemos emitir hacia la atmósfera 270.000 millones de toneladas de carbono más para que el calentamiento no sobrepase los dos grados. Al ritmo actual de emisión de 10.000 millones de toneladas anuales quemaremos este «presupuesto de carbono» en solo treinta años. Según un análisis reciente, permanecer por debajo de los 2 ºC exigirá que un tercio de las reservas de petróleo, la mitad del gas natural y un ochenta por ciento del carbón se queden en el suelo [*véase* «Reservas intocables», por M. Jakob y J. Hilaire; Investigación y Ciencia, agosto de 2015].

No es pedir poco. Significa que debemos ir prescindiendo del carbón y olvidarnos de la mayor parte de las arenas bituminosas, si no de todas —adiós, oleoducto Keystone XL—. Significa también que no podemos quemar cantidades crecientes de gas natural como «puente» hacia un clima futuro más limpio alimentado por fuentes de energía renovables.

Suele equipararse el umbral de los dos grados con mantener la concentración atmosférica de dióxido de carbono por debajo de las 450 partes por millón (ppm). El reto se hace más difícil a medida que se usa menos carbón. Cuando se quema, este desprende a la atmósfera partículas que, al quedar suspendidas como aerosoles de sulfato, reflejan hacia el espacio una parte de la energía solar entrante. En un artículo que publiqué en estas páginas [*véase* «Falsas esperanzas»; Investigación y Ciencia, junio de 2014], calculé que, para compensar hacia finales del siglo la reducción a cero de las emisiones de azufre, tendremos que satisfacer un objetivo de CO_2 de unas 405 ppm, apenas por encima de los niveles actuales.

¿Podremos hacerlo? Según el climatólogo James E. Hansen, sería posible extraer alrededor de cien mil millones de toneladas de carbono del aire mediante la reforestación masiva (limitando el uso de tierras en una medida suficiente para que los bosques puedan crecer de nuevo hasta cubrir una extensión como la que tenían antes de la deforestación humana). Esto, junto con la reducción de las emisiones de carbono en varios puntos porcentuales al año —empresa difícil pero factible—, podría satisfacer el objetivo de la estabilización en dos grados.



A lo largo de la historia, se ha certificado preventivamente un sinfín de imposibilidades que luego no fueron tales. Como Joe Romm, del Centro para el Progreso Americano, dijo respondiendo a los críticos en materia climática: «Gracias sean dadas a que estos opinadores no estaban por ahí cuando tuvimos que hacer algo difícil de verdad: sufrir millones de bajas y rehacer nuestra economía de la noche a la mañana para ganar la Segunda Guerra Mundial». Un inspirado acuerdo en la cumbre del clima de París de este mes podría poner en marcha un empeño ambicioso pero del todo realizable.

La clave es que hay innovaciones técnicas y economías de escala que surgen solo cuando se está haciendo realmente algo. El precio de las células solares, por ejemplo, ha caído mundialmente en más de un 50 por ciento a lo largo de los últimos años al incrementar China su producción. Los que dicen «no, no podemos» se dedican a las profecías que se cumplen a sí mismas.

Aun con innovación y economías de escala, en algún momento quizá tengamos que aplicar técnicas de «captura directa del aire» para extraer dióxido de carbono de la atmósfera. Sería caro, pero Klaus Lackner, profesor de ingeniería de la Universidad estatal de Arizona, confía en que el coste descendería hasta menos de 30 dólares por tonelada cuando se fabricaran en masa.

El coste de actuar es solo la mitad del de no hacerlo. No es una conclusión del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, sino de ExxonMobil, que ha calculado el verdadero coste del carbono para la sociedad en 60 dólares la tonelada. Otras estimaciones son aún más altas. ¿Podemos permitirnos estabilizar el calentamiento planetario por debajo de los dos grados? Lo que no podemos permitirnos es no hacerlo.

ANDREW J. NILSEN

NEUROCIENCIA

LAS FUNCIONES VITALES DEL SUEÑO

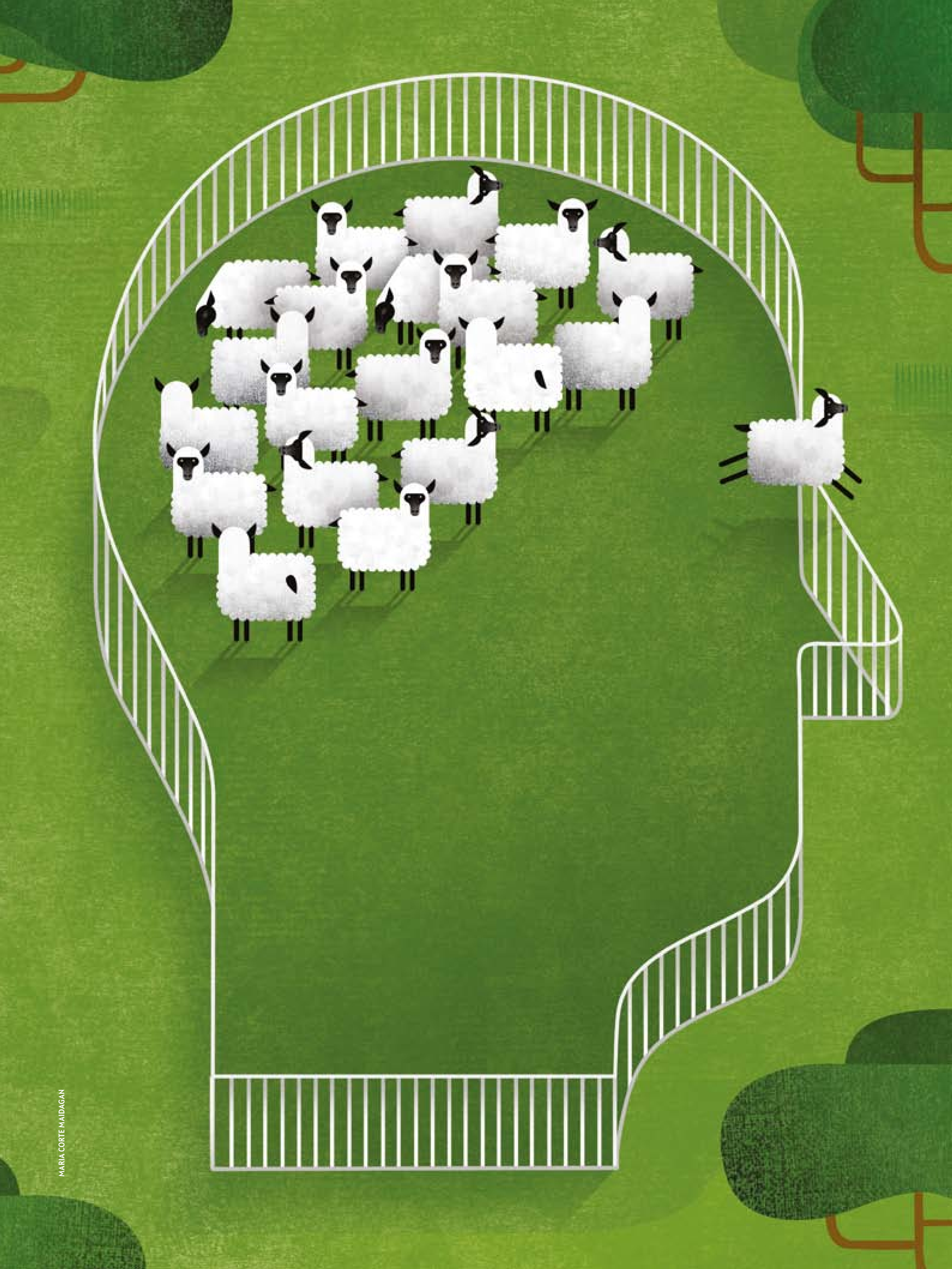
El descanso nocturno ejerce una influencia profunda en los sistemas nervioso, inmunitario y endocrino

Robert Stickgold

«¿Es de verdad necesario dormir?» En mis viajes por todo el mundo para hablar del sueño, me han formulado esta pregunta infinidad de veces. Y mi respuesta es siempre la misma: sí, todos precisamos dormir. A semejanza del hambre, la sed o la libido, el sueño es una necesidad fisiológica. Pero la razón exacta por la que pasamos un tercio de la vida sumidos en la inconsciencia ha representado un misterio desde hace mucho tiempo.

A la vez que reconocía nuestras lagunas de conocimiento, Allan Rechtschaffen, uno de los investigadores del sueño más prominentes del mundo, afirmó en 1978: «Si el sueño no sirviera a una función absolutamente vital, sería el mayor error cometido jamás por la evolución». En los años noventa, J. Allan Hobson, otro prestigioso especialista en la materia, comentaba con ironía que la única función conocida del sueño era curar la somnolencia.

Las investigaciones en estos veinte años han comenzado por fin a ofrecer una explicación parcial de la razón de ser del sueño. Si algo está claro es que no responde a una sola finalidad. Parece que se necesita para el funcionamiento óptimo de numerosos procesos biológicos. Influye en la actividad del sistema inmunitario, el correcto equilibrio hormonal, la salud mental y emocional, el aprendizaje y la memoria, y también en la eliminación de toxinas del cerebro. Sin embargo, ninguna de tales funciones falla por completo si no se duerme. En general, el sueño parece mejorar el rendimiento de esos sistemas sin ser absolutamente necesario. Pero, aun así, cualquiera que sufra insomnio durante meses acabará muriendo.



MARIA CORTE MAIDAGAN

Ese conocimiento imperfecto ha tardado décadas en gestarse. A finales del siglo pasado se abandonaron las viejas ideas acerca del sueño (como que estaba causado por la retirada de la sangre de la superficie de la piel o por la acumulación de vapores tibios en el estómago) y se empezaron a realizar mediciones minuciosas de la actividad de las ondas cerebrales, de los patrones de la respiración y de las oscilaciones diarias de las hormonas y otras moléculas sanguíneas. En los últimos años, se han comenzado a desentrañar los aspectos del sueño que son relevantes por los beneficios que conllevan. Resulta irónico que, cuanto más se confirma la necesidad incontestable de pasar una buena noche para el correcto funcionamiento de la mente y del cuerpo, los ciudadanos del siglo XXI pasemos menos tiempo en los brazos de Morfeo.

Robert Stickgold es director del Centro del Sueño y la Cognición del Centro Médico Diaconisa Beth Israel, en Boston, y profesor titular en la Escuela de Medicina de Harvard.



INSOMNIO MORTAL

La prueba más tangible de la necesidad imperativa de dormir la brinda un estudio publicado en 1989 por Carol Everson cuando trabajaba en el laboratorio de Allan Rechtschaffen. Everson, ahora en el Colegio Médico de Wisconsin, comprobó que las ratas a las que se impedía dormir por completo morían en el plazo de un mes. En realidad, todo lo que tenía que hacer para obtener ese resultado fatídico era evitar que entraran en la fase del sueño caracterizada por el movimiento rápido de los ojos (fase REM, del inglés *rapid eye movement*). Pero, un cuarto de siglo después, aún se ignora por qué mueren las ratas. Una serie de experimentos efectuados durante ese tiempo solo ha servido para descartar causas: la muerte no sobreviene por el incremento del estrés, por el excesivo consumo de energía o por el mal funcionamiento de los termorreguladores internos o del sistema inmunitario.

La muerte por privación del sueño no solo afecta a las ratas. El insomnio familiar mortal, descrito por primera vez hace treinta años, es, como su nombre indica, un trastorno hereditario humano que aboca a un insomnio persistente y, en última instancia, al fallecimiento. En 1986, un equipo liderado por Elio Lugaresi y Rossella Medori, entonces en la facultad de medicina de la Universidad de Bolonia, relató el caso de un varón de 53 años que había perecido después de sufrir un insomnio intratable durante meses, como muchos familiares suyos desde hacía dos generaciones. El examen del encéfalo en la autopsia reveló una pérdida masiva de neuronas en dos regiones del tálamo, una estructura del tamaño de una nuez que forma parte del mesencéfalo y que suele actuar como centro de relevo de los estímulos sensoriales. Ambas regiones son más conocidas por su cometido en la regulación de la memoria emocional y en la emisión de los llamados husos del sueño, un trazado clave de las ondas electroencefalográficas durante el sueño.

No se sabe con certeza la razón por la que ese deterioro del tálamo condena al insomnio y a la muerte, pero por fin conocemos la causa inmediata del daño. A inicios de los años noventa, Medori, entonces en la Universidad de Case Western Reserve, y su equipo descubrieron que una proteína deforme, un prion, era la responsable de la destrucción. Los priones son conocidos por causar la tembladera de las ovejas y la encefalopatía espongiforme bovina (la «enfermedad de las vacas locas»), que afecta a los humanos, aunque en el caso del insomnio familiar mortal, el prion pasa de una generación a otra en lugar de ser adquirido desde el entorno, como sucede en los otros dos trastornos.

Por suerte, no se conocen otras situaciones que deriven en muerte a causa de una privación del sueño. Pero tampoco se tiene constancia de que nadie haya permanecido insomne durante meses enteros. Contamos, pues, con dos ejemplos en los que la ausencia total y prolongada del sueño (la provocada experimentalmente en ratas y la asociada a una enfermedad priónica en humanos) da lugar a la muerte, pero se ignora aún la causa exacta de esta última en ambos casos.

ANTICUERPOS Y HORMONAS

Entretanto, hemos averiguado que solo una noche de insomnio completo o parcial altera distintas funciones corporales, como la actividad hormonal y la protección contra las infecciones. Dos estudios que han examinado la respuesta del organismo a la vacunación contra la hepatitis ponen de manifiesto el calado de los efectos que la falta de sueño provoca en el sistema inmunitario. En el primer experimento, que se remonta a 2003, un pequeño grupo de estudiantes universitarios recibió la vacuna contra la hepatitis A a base del virus inactivado. Cuando llegó la noche, se dejó dormir a la mitad de ellos, mientras que a la otra mitad se la mantuvo en vilo hasta la noche siguiente.

Al cabo de cuatro semanas, se tomaron muestras de sangre de los estudiantes y se cuantificó el número de anticuerpos que su sistema inmunitario había generado como respuesta contra el virus de la vacuna. Los niveles elevados indicarían una respuesta potente y, por ende, una mayor protección contra futuras infecciones del patógeno. A las cuatro semanas, el grupo que había podido dormir como de costumbre presentaba valores de anticuerpos un 97 por ciento superiores a los del grupo insomne.

Pero los efectos negativos ya se notan con menos de una noche entera en vilo. En el segundo estudio, los adultos recibieron las tres dosis pautadas de la vacuna contra la hepatitis B en el curso de seis meses. (Las dosis de recuerdo son necesarias para conferir una protección plena.) Cada participante recibió un detector de movimiento similar a un reloj, que monitorizó el sueño en casa. Al comparar el tiempo medio de sueño durante la

EN SÍNTESIS

Numerosos estudios, por no citar la experiencia cotidiana, avalan el vínculo entre una buena noche de sueño y el estado de ánimo, la memoria y el aprendizaje.

Un creciente número de experimentos llevados a cabo en los últimos veinte años han constatado que el mecanismo del sueño influye directamente en otras funciones corporales, desde el equilibrio hormonal hasta la protección inmunitaria.

A pesar de esos descubrimientos, seguimos sin saber con certeza por qué estamos obligados a caer en los brazos de Morfeo a diario, aunque cada vez se está aprendiendo más sobre lo que le sucede a nuestro organismo cuando dormimos.

semana de la primera dosis de la vacuna con el grado de protección conferido por los anticuerpos a partir de la segunda dosis, los investigadores demostraron que los niveles de anticuerpos aumentaban un 56 por ciento con cada hora más de sueño. Seis meses después de la última dosis, los que en promedio habían dormido menos de seis horas diarias durante la semana de la primera dosis vacunal eran siete veces más propensos a presentar valores tan bajos de anticuerpos en la sangre que no se les podía considerar inmunizados contra futuras infecciones del virus de la hepatitis B.

Una prueba excelente de la alteración de la función endocrina procede de una serie de ensayos llevados a cabo por Karine Spiegel, que trabajaba a la sazón con Eve Van Cauter en la Universidad de Chicago. En uno de tales experimentos, se permitió a 11 varones jóvenes sanos que durmieran solo cuatro horas cada noche. Al cabo de cinco noches, su capacidad para extraer la glucosa de la sangre (proceso controlado por la hormona insulina) había disminuido un 40 por ciento. En otro estudio, el equipo de Spiegel restringió el sueño de forma similar a 12 hombres durante dos noches. Las concentraciones de grelina (hormona estimuladora del apetito) en la sangre de los voluntarios habían aumentado un 28 por ciento. Al mismo tiempo, los valores de otra hormona, la leptina, habían descendido un 18 por ciento; la leptina inhibe el hambre al indicar al encéfalo que ya no es necesario comer. No sorprende, pues, que los privados de sueño refirieran un incremento medio del apetito del 23 por ciento.

Tomados en conjunto, esos estudios fisiológicos sugieren que el insomnio podría favorecer la ganancia de peso, hipótesis que ahora sustenta por lo menos otro medio centenar de investigaciones. En varias de ellas, los niños de entre 6 y 9 años que habían dormido menos de diez horas tenían entre una y dos veces y media más posibilidades de sufrir obesidad, y los estudios en adultos indican un aumento del 50 por ciento de esta entre los participantes que duermen menos de seis horas. La investigación también pone de manifiesto una relación entre la restricción del sueño y el desarrollo de la diabetes de tipo 2.

BOMBA DE NEGATIVIDAD

A pesar de los notables efectos del insomnio en las funciones del sistema inmunitario y endocrino, seguramente el mayor impacto se aprecia en el encéfalo. En 2006 emprendí un estudio con Matthew P. Walker, ahora en la Universidad de California en Berkeley, en el que analizamos la repercusión de una sola noche sin dormir en la memoria emocional. A 26 personas (la mitad privadas de sueño en la víspera) se les mostraron palabras positivas, negativas y neutras (del tipo, «tranquilidad», «tristeza» o «sauce») y se les pidió que valoraran su emotividad. Después, tras dos noches de sueño reparador, se les sometió a una prueba de memoria sin previo aviso.

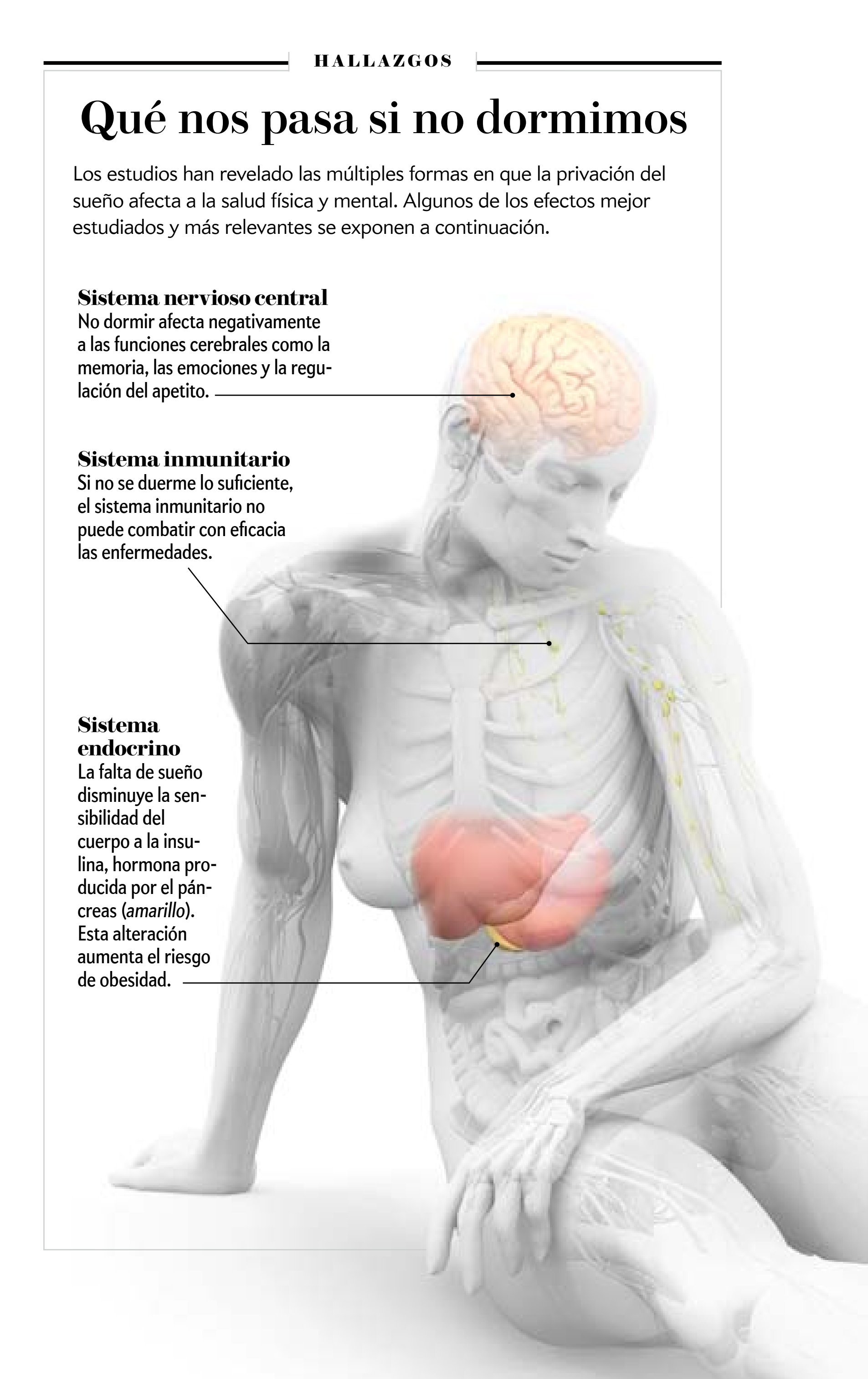
Comparadas con las personas que habían dormido como de costumbre, las privadas de sueño antes de ver las palabras por primera vez mostraron un deterioro del 40 por ciento en la capacidad para recordarlas. Pero lo más sorprendente fue el impacto relativo del insomnio en las tres categorías de palabras. El reconocimiento de las positivas y neutras se redujo a la mitad en los que habían permanecido en vilo. En cambio, su capacidad para rememorar las negativas solo se deterioró un 20 por ciento. Los que durmieron con normalidad recordaban más o menos igual los vocablos positivos y negativos, pero algo menos los neutros. Dicho de otro modo, el recuerdo de las palabras negativas parecía ser como mínimo dos veces más vívido que el de los vocablos positivos y neutros en los voluntarios obligados a permanecer insomnes.

Ese resultado apunta a la espantosa posibilidad de que, si no se duerme, uno acabe recordando mucho más los sucesos negativos que los positivos, generando con ello una memoria sesgada, y seguramente deprimente, de la vida cotidiana. De

HALLAZGOS

Qué nos pasa si no dormimos

Los estudios han revelado las múltiples formas en que la privación del sueño afecta a la salud física y mental. Algunos de los efectos mejor estudiados y más relevantes se exponen a continuación.



BRYAN CHRISTIE

hecho, en los últimos 25 años varios estudios han llegado a la conclusión de que no dormir bien, en ciertas circunstancias, provoca una depresión lo bastante grave para ser diagnosticada como depresión mayor y tal vez contribuya a otros trastornos psiquiátricos.

Las pruebas acerca del vínculo causal del insomnio con la depresión han aumentado en los últimos años y proceden sobre todo de los estudios sobre la apnea del sueño, un trastorno en el que el flujo de aire que penetra en los pulmones queda interrumpido durante el sueño. La apnea puede provocar ronquidos, jadeos y otras alteraciones de la respiración. Cada vez que una persona apneica cesa de respirar unos segundos, se despierta un momento para tomar aliento. Como consecuencia, los afectados graves pueden despertarse cada minuto o dos durante toda la noche. Un estudio de 2012 a cargo de los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades de EE.UU. halló que los hombres y las mujeres diagnosticados de apnea del sueño presentaban 2,4 y 5,2 veces más posibilidades, respectivamente, de sufrir depresión mayor que las personas que gozaban de un buen descanso nocturno.

Por supuesto, hallar una correlación entre ambos trastornos no equivale a demostrar que uno sea la causa del otro. Pero un análisis reciente de 19 estudios constató que el tratamiento de la apnea del sueño con respiradores de presión positiva continua (PPC), que restauran la respiración y el sueño normales, reduce notablemente los síntomas depresivos. Además, uno de los ensayos, que casualmente había incluido de partida un mayor porcentaje de pacientes deprimidos que los demás, cuantificó la reducción de los síntomas depresivos en un 26 por ciento entre los usuarios de esos aparatos.

Tales resultados siguen sin demostrar de manera concluyente que el sueño irregular cause depresión, como tampoco se comparó el efecto del tratamiento con el respirador de PPC respecto al de los antidepresivos. Pero no hay duda de que merece la pena seguir investigando la cuestión con detenimiento. De modo similar, un estudio de 2007 comprobó que el tratamiento de la apnea en niños con trastorno por déficit de atención e hiperactividad propiciaba un descenso del 36 por ciento en la valoración del cuadro de hiperactividad, una reducción sensiblemente mayor que el 24 por ciento logrado por los medicamentos habituales para el trastorno.

RECUERDOS FUTUROS

Si bien se desconoce el mecanismo fisiológico por el que el sueño influye en la salud mental, se sospecha que en ello tiene mucho que ver la transformación de las vivencias diarias en recuerdos. Las últimas dos décadas han presenciado un aluvión de descubrimientos que demuestran la implicación del sueño en el procesamiento de los recuerdos, sea cual sea el estado anímico. Se ha comprobado así que dormir después de actividades de aprendizaje facilita la estabilización, la consolidación, la integración y el análisis selectivo de los nuevos recuerdos. El sueño controla de este modo lo que recordamos y cómo lo recordamos.

A caballo de los siglos xix y xx, se consideraba que los recuerdos eran endebles hasta que no experimentaban un proceso de consolidación que los convertía en estables para el resto de la vida. Investigaciones posteriores han demostrado que los recuerdos conservan la capacidad de cambiar aun después de que el cerebro los haya adquirido y consolidado. De hecho, la reactivación de un recuerdo puede devolverlo a su estado inestable mucho tiempo después de su formación, lo cual exige su nueva consolidación; mientras permanece en ese estado de fragilidad, puede cambiar o perderse por completo. Este hallazgo es a la vez una maldición y una bendición, en el primer caso porque la información que en su origen es exacta puede corromperse, y en el segundo porque la que es imprecisa puede ser corregida. Así pues, los investigadores han comenzado a hablar de «evolución» de la memoria en lugar de consolidación, sobre todo cuando aluden al procesamiento de la memoria durante el sueño.

En los últimos 25 años, varios estudios han llegado a la conclusión de que no dormir bien, en ciertas circunstancias, provoca una depresión lo bastante grave para ser diagnosticada como depresión mayor

La época moderna de la investigación sobre el sueño y la memoria comenzó hace apenas veinte años, cuando Avi Karni y sus colaboradores de Israel demostraron que las personas entrenadas para una tarea de discriminación visual mejoraban los resultados después de una noche de sueño, pero solo si podían consumar la fase REM (en la que tiene lugar la mayoría de los sueños). El experimento reveló que el sueño hace algo más que estabilizar los recuerdos: frena su deterioro causado por el paso del tiempo y, además, los mejora.

En el 2000, Walker entró en mi despacho esgrimiendo un artículo y predijo: «¡Esto también depende del sueño!». El trabajo describía una tarea en la que los participantes aprendían a repiquetear una secuencia de movimientos con los dedos, que con el tiempo cada vez era más fácil de interpretar, aun sin practicar más. Pero los autores no habían investigado si el sueño influía en ese progreso. En dos semanas, Walker tenía la respuesta. Primero constató que el sueño había mejorado su interpretación y después determinó que el progreso dependía de una fase de sueño ligero, y no del sueño REM, como en los experimentos de visión de Karni. La conclusión resultaba ineludible: el cerebro refuerza distintos tipos de memoria en diferentes fases del sueño.

Investigaciones ulteriores han demostrado que no todos los tipos de memoria experimentan esa estabilización durante el sueño. En 2008, Jessica Payne, hoy en la Universidad de Notre Dame, hizo un estudio en el que mostraba a voluntarios diversas escenas con objetos aversivos, como un gato muerto en mitad de la calle. Comprobó que, después de dormir, los sujetos recordaban con precisión la imagen del gato muerto, pero habían olvidado el trasfondo de la escena. Lo más sorprendente era que este olvido selectivo de los detalles del entorno no sucedía cuando veían las imágenes por la mañana y eran evaluados por la tarde, después de permanecer despiertos todo el día. Y tampoco se producía si la imagen central no era aversiva, por ejemplo, si se veía un gato cruzando la calle. Así pues, el sueño, y no la vigilia, hacía que el cerebro de los participantes retuviera con

preferencia las emotivas imágenes centrales, y no las neutras (el gato cruzando la calle) o los detalles del trasfondo.

Pero el sueño no solo refuerza prioritariamente la memoria emocional. Parece que todo lo que uno considera importante queda retenido durante el sueño. Dos grupos europeos han demostrado que el hecho de indicar o no a las personas instruidas en una tarea que serán examinadas sobre esta después de dormir influye en lo que sucede durante el descanso. Como era de esperar, la información cuya retentiva mejora al día siguiente es aquella de la que han sido advertidas. En cambio, si se instruyen por la mañana y se les dice que tal vez serán examinadas esa misma tarde no parece influir en nada. El sueño, y no la vigilia, refuerza selectivamente los recuerdos que nuestro cerebro considera valiosos.

Estos hallazgos suponen una elegante prueba en favor de los argumentos de Daniel Schacter, de la Universidad Harvard, quien afirma que la memoria sirve al futuro, no al pasado. Aduce que el fin último de nuestra memoria no es recordar el pasado, sino poder usar más adelante la experiencia en nuestro provecho. En este contexto, no sorprende que al sueño le importe sobre todo la información que pueda resultar relevante en el futuro. Cuando decimos que consultaremos una cuestión con la almohada, no solo le estamos pidiendo al cerebro durmiente que recuerde algo. Queremos que tome la información que ya está retenida y que haga algún tipo de cálculo, baraje las posibilidades y dé con la mejor solución al problema. Y así es como procede, en realidad.

Un ejemplo destacable de esa capacidad de análisis es el expuesto por un experimento de predicción meteorológica concebido por Barbara J. Knowlton y sus colaboradores, de la Universidad de California en Los Ángeles. Knowlton mostraba a un grupo de personas una o varias cartas de un juego de cuatro, cada una con distintas figuras geométricas (círculos, rombos, cuadrados o triángulos). Antes de que los participantes iniciaran la tarea, los investigadores asignaron en secreto a cada carta un fenómeno meteorológico imaginario, lluvia o sol. Entonces, según la carta mostrada, pidieron a los participantes que pronosticaran si las cartas indicaban si el tiempo sería lluvioso o soleado. Los participantes acabaron deduciendo la relación entre las cartas y el tiempo. Por ejemplo, en la primera ronda podía salir la carta de rombos, y se les dijo que el tiempo era soleado. A continuación, en la segunda ronda se mostraban al unísono las cartas de círculos y de triángulos, y el tiempo resultaba ser lluvioso. Solo con esas dos primeras rondas, los probandos comenzaron a elaborar hipótesis sobre las relaciones, como que los rombos significaban tiempo soleado. Pero entonces, en la tercera ronda, podía volver a salir la carta de rombos, pero esta vez significaba lluvia.

El truco radica en que las cartas solo están vinculadas con el tiempo en términos de probabilidad. Es decir, la carta de diamantes predice sol el 80 por ciento de las veces, pero en el restante 20 por ciento, comporta lluvia. Otras cartas solo predicen tiempo soleado entre el 20 y el 60 por ciento de las veces. En el estudio de Knowlton, los participantes no consiguieron dominar la tarea al cabo de 200 rondas, pues su porcentaje de acierto rondó el 75 por ciento.

Ese tipo de pruebas ha permitido distinguir entre los diferentes sistemas de memoria del cerebro, los que intervienen en el recuerdo de los hechos (el sistema «qué») y los implicados en las habilidades de aprendizaje (el sistema «cómo»). A medida que la persona practica la tarea de pronóstico meteorológico, pasa lentamente del sistema qué al de cómo. Cuando en mi laboratorio Ina Djonlagic se preguntó lo que le sucede a esa información durante el sueño, obtuvo un resultado sorprendente. Si los voluntarios practicaban la tarea por la mañana y eran sometidos a prueba esa misma tarde, su porcentaje de acierto rondaba también el 75 por ciento, esto es, parecían retener por entero la información que habían aprendido por la mañana. Pero cuando otros participantes practicaban por la tarde y eran examinados al día siguiente después de dormir, presentaban una mejora del 10 por ciento en la predicción respecto a la tarde anterior. De alguna manera, tras el descanso el cerebro mejoró la comprensión de la relación entre las cartas y la meteorología. Los participantes contaban con un modelo más refinado de cómo funcionaba el mundo.

Cuanto más exploramos lo que sucede mientras dormimos, más son los beneficios nuevos que descubrimos sobre el sueño. La incorporación más reciente a la lista es la eliminación de los productos de desecho del cerebro. En 2013, Lulu Xie y sus colaboradores, del Centro Médico de la Universidad de Rochester, descubrieron que el espacio entre las células del cerebro se ensancha durante el sueño, lo que facilita la circulación del líquido cefalorraquídeo entre el encéfalo y la médula espinal. Cuando inyectaron a ratones amiloide beta (precursor de las placas amiloides presentes entre las neuronas en la enfermedad de Alzheimer), comprobaron que durante el sueño la sustancia era retirada del cerebro el doble de rápido que en los roedores despiertos. Supuestamente, el incremento del flujo de líquido cefalorraquídeo ayuda a eliminar del encéfalo esta molécula potencialmente tóxica y a llevarla lejos de los lugares donde podría causar más daño. A los investigadores les gustaría saber ahora si el mayor flujo que suele haber durante el sueño se halla alterado en los enfermos de alzhéimer.

A la vista de los recientes hallazgos sobre las numerosas funciones del sueño y la perspectiva de que se descubran aún más, dormir poco parece una estrategia totalmente errónea para afrontar las exigencias de la vida cotidiana. En conjunto, los resultados de los estudios que examinan el papel del sueño en las funciones hormonales, inmunitarias y de la memoria indican que quien no duerme lo suficiente corre el riesgo de acabar —aparte de muy cansado— enfermo, obeso, desmemoriado y profundamente deprimido.

PARA SABER MÁS

Sleep deprivation in the rat: An update of the 1989 paper. Allan Rechtschaffen y Bernard M. Bergmann en *Sleep*, vol. 25, n.º 1, págs. 18-24, 2002. **www.journalsleep.org/Articles/250104.pdf**

Sleep and the epidemic of obesity in children and adults. Eve Van Cauter y Kristen L. Knutson en *European Journal of Endocrinology*, vol. 159, suplemento n.º 1, págs. S59-S66, diciembre de 2008. **www.eje-online.org/content/159/suppl_1/S59.full**

To sleep, to strive, or both: How best to optimize memory. Matthew A. Tucker et al. en *PLOS ONE*, vol. 6, n.º 7, art. e21737, 20 de julio de 2011. **journals.plos. org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0021737**

EN NUESTRO ARCHIVO

Actividad cerebral durante el sueño. Robert Stickgold y Jeffrey M. Ellenbogen en *MyC*, n.º 41, 2010.

Dormir para recordar. Pierre Maquet en *MyC*, n.º 43, 2010.

Los beneficios del sueño. Giulio Tononi y Chiara Cirelli en *IyC*, octubre de 2013.

Secretos del descanso reparador. Jason Castro en *MyC*, n.º 60, 2013.

Nuestros relojes internos. Keith C. Summa y Fred W. Turek en *IyC*, septiembre de 2015.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,90€



Para efectuar tu pedido:

Teléfono: (34) 934 143 344

A través de nuestra Web:

www.investigacionyciencia.es

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorra un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 27,60€

SELECCIONES TEMAS

Ahorra más del 25 %

Ponemos a tu disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materias.

3 ejemplares = 15,00 €

1. **ASTRONOMÍA**
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. **BIOLOGÍA**
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. **COMPUTACION**
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. **FÍSICA**
Núcleos atómicos y radiactividad, Fenómenos cuánticos, Fronteras de la física
5. **CIENCIAS DE LA TIERRA**
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. **GRANDES CIENTÍFICOS**
Einstein, Newton, Darwin
7. **MEDICINA**
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. **MEDIOAMBIENTE**
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. **NEUROCIENCIAS**
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
11. **LUZ Y TÉCNICA**
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser
12. **ENERGÍA**
Energía y sostenibilidad, El futuro de la energía (I), El futuro de la energía (II)

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorra más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*

ANUAL (2 tomos) = 12,00 €

más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

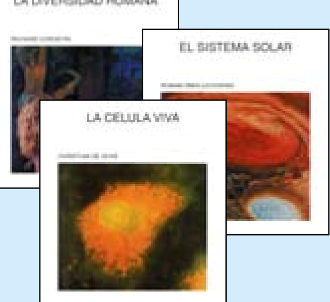
BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €



GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

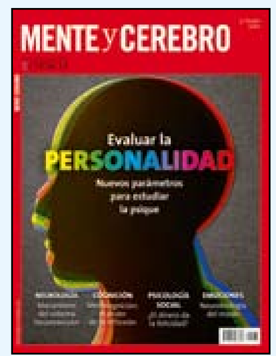
MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,90 €

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones *
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito *
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria *
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad
MyC 58: El poder del bebé
MyC 59: Las huellas del estrés
MyC 60: Evolución del pensamiento
MyC 61: TDAH
MyC 62: El legado de Freud
MyC 63: ¿Qué determina la inteligencia?
MyC 64: Superstición
MyC 65: Competición por el cerebro
MyC 66: Estudiar mejor
MyC 67: Hombre y mujer
MyC 68: La hipnosis clínica
MyC 69: Cartografía cerebral
MyC 70: Pensamiento creativo
MyC 71: El cerebro bilingüe
MyC 72: Musicoterapia
MyC 73: La neurociencia del futuro
MyC 74: El poder de las marcas
MyC 75: Evaluar la personalidad

(*) Disponible solo en formato digital





TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,90 €

T-1: Grandes matemáticos *
T-2: El mundo de los insectos *
T-3: Construcción de un ser vivo *
T-4: Máquinas de cómputo
T-5: El lenguaje humano *
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-10: Misterios de la física cuántica *
T-11: Biología del envejecimiento *
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-19: Los orígenes de la humanidad *
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales *
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-28: La consciencia *
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo *
T-52: El origen de la vida *
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen? *
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico *
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana
T-71: Retos de la agricultura
T-72: Origen y evolución del universo
T-73: El sida
T-74: Taller y laboratorio
T-75: El futuro de la energía (I)
T-76: El futuro de la energía (II)
T-77: El universo matemágico de Martin Gardner
T-78: Inteligencia animal
T-79: Comprender el cáncer
T-80: Grandes ideas de la física
T-81: Epigenética

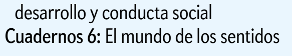
(*) Disponible solo en formato digital



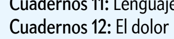


Precio por ejemplar: 6,90 €

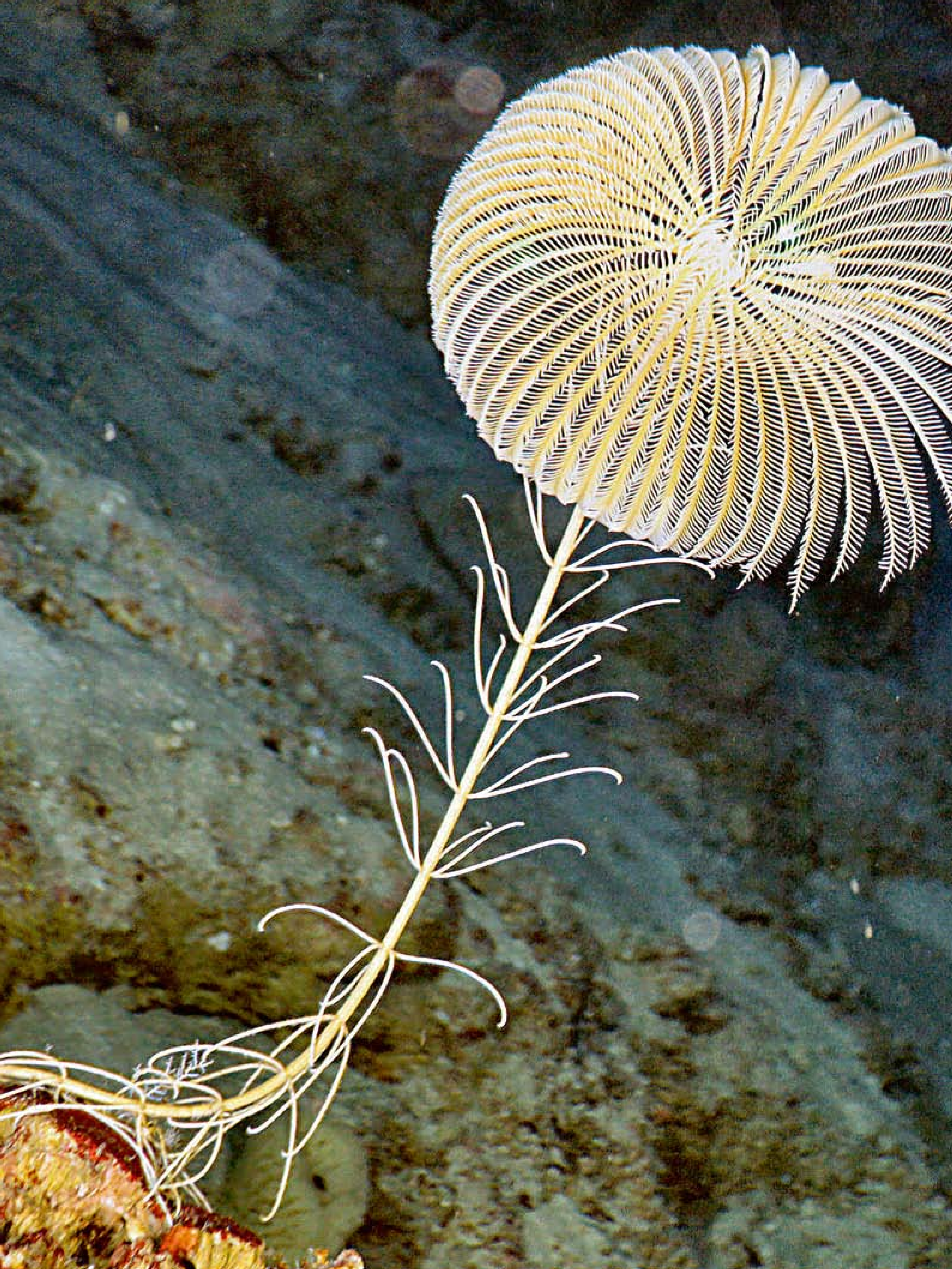
Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones
Cuadernos 4: Las neuronas
Cuadernos 5: Personalidad, desarrollo y conducta social
Cuadernos 6: El mundo de los sentidos



Cuadernos 7: El sueño
Cuadernos 8: Neuroglía
Cuadernos 9: La memoria
Cuadernos 10: Adicciones
Cuadernos 11: Lenguaje y comunicación
Cuadernos 12: El dolor









PALEONTOLOGÍA

EVOLUCIÓN DE LA SIMETRÍA EN LOS EQUINODERMOS

Nuevos fósiles del Cámbrico revelan que los primeros animales de este grupo no eran radiales, sino bilaterales. Ello arroja luz sobre el origen de la simetría pentámera que presentan en la actualidad

Samuel Zamora

CORTESÍA DE CHARLES G. MESSING Y TOMASZ K. BAUMILLER

LOS LIRIOS DE MAR, o crinoideos, son el grupo más primitivo de equinodermos y, como los demás grupos actuales, presentan simetría pentámera. Están provistos de un penacho de cinco brazos muy ramificados con los que filtran el agua para extraer nutrientes. En la imagen, *Cenocrinus asterius* en las costas atlánticas de Honduras.

Samuel Zamora es paleontólogo del Museo Geominero del Instituto Geológico y Minero de España y, desde 2013, investigador asociado de la Institución Smithsoniana en Washington D.C. Su trabajo se centra en los equinodermos del Paleozoico y ha descrito más de 40 especies fósiles nuevas.



LAS ESTRELLAS Y LOS ERIZOS DE MAR, TAN COMUNES en nuestras costas, pertenecen al grupo animal de los equinodermos. Una de las características más notables de estos animales es que su cuerpo se divide en cinco partes iguales, es decir, presenta simetría pentámera. Este rasgo resulta llamativo si se tiene en cuenta que la simetría predominante en el reino animal es la bilateral, aquella en la que el cuerpo se divide en dos partes iguales.

Los propios humanos presentamos simetría bilateral. Se trata de una característica muy primitiva y omnipresente dentro de los deuteróstomos, el gran grupo animal al que pertenecen nuestra especie y los equinodermos. De hecho, las propias larvas de los equinodermos la exhiben. Todos los deuteróstomos son bilaterales en todo su ciclo biológico o, por lo menos, en su estadio larvario. Pero solo los equinodermos evolucionaron hacia la adquisición de un plan pentarradiado en la fase adulta.

La ciencia trata de entender por qué los equinodermos exploraron este nuevo plan corporal. Desde hace décadas, los paleontólogos hemos buscado entre las rocas más antiguas del Cámbrico (hace entre 540 y 500 millones de años), donde aparecen los primeros equinodermos, para intentar dilucidar si los fósiles podían aportar alguna pista. Pero, hasta hace poco, todos los hallazgos apuntaban a la misma conclusión: los primeros equinodermos ya eran radiales.

Sin embargo, ciertos fósiles descubiertos recientemente en el Parque Natural del Moncayo, en Zaragoza, demuestran que los equinodermos más primitivos poseían una simetría bilateral muy parecida a la nuestra. Estos y otros datos indican que solo más tarde en su historia evolutiva estos animales desarrollaron un cuerpo radial y pentámero. La descripción morfológica y anatómica de las formas antiguas está ayudando a interpretar las ventajas que ofrecería la aparición de la simetría pentámera, entre ellas la capacidad de interactuar con el entorno en todas las direcciones y explotar con mayor facilidad los recursos alimentarios.

Asimismo, la inclusión de los hallazgos fósiles recientes en el árbol evolutivo de los equinodermos está contribuyendo a clarificar las relaciones de parentesco de los miembros más basales del grupo, justo al principio de su evolución y en los albores de la explosión cámbrica de la vida compleja.

LOS CINCO GRUPOS ACTUALES

Los equinodermos son deuteróstomos, un superfilo de animales que incluye, además, a los cordados, grupo al que pertenecemos los humanos, y a los hemicordados, un grupo de gusanos marinos entre los que figuran los gusanos bellota o los ya extintos graptolites.

En la actualidad existen cinco grandes grupos de equinodermos que reciben el rango de clase: los equinoideos (erizos de mar), los asteroideos y ofiuroideos (dos tipos de estrellas de mar), las holoturias (pepinos marinos) y los crinoideos (lirios de mar). Se encuentran en todos los mares, desde las zonas de rompientes hasta los fondos abisales.

Según los estudios genéticos, los crinoideos son los más primitivos de todos los grupos actuales. Presentan simetría radial pentámera y, salvo algunas excepciones, viven fijos al sustrato (son sésiles). Su cuerpo se eleva en la columna de agua hasta varios metros de altura gracias a un pedúnculo o «tallo» muy flexible. En su parte superior se despliega un gran penacho de tentáculos o brazos cuya principal finalidad es captar las partículas nutritivas a partir del filtrado del agua marina. A pesar de su carácter primitivo, los primeros crinoideos aparecieron relativamente tarde en la historia evolutiva del grupo: durante el Ordovícico inferior, hace 490 millones de años. Casi a la vez surgieron las primeras estrellas de mar y, poco más tarde, los erizos de mar y las holoturias.

ORIGEN REMOTO

El período Cámbrico es el más importante de la historia de la vida. En un proceso corto, en términos geológicos, los mares se poblaron de animales complejos, muchos de los cuales representaron los ancestros de los grupos que dominan hoy los mares. A este evento se le conoce como explosión cámbrica [*véase* «Orígenes de la diversidad biológica», por Jean Vannier; Investigación y Ciencia, abril de 2008].

Los equinodermos no fueron una excepción. Aparecieron hace unos 520 millones de años, durante el Cámbrico inferior. Aunque algunos de estos primeros equinodermos se asemejaban superficialmente a los grupos actuales, otros exhibían formas corporales totalmente dispares.

EN SÍNTESIS

La simetría pentámera de los equinodermos ha intrigado desde hace tiempo a zoólogos y paleontólogos, porque constituye una singularidad dentro del reino animal, donde predomina la simetría bilateral.

El estudio de los fósiles ha contribuido a aclarar el origen de este rasgo. Hallazgos recientes apuntan a que, en sus inicios, los equinodermos eran bilaterales y solo más tarde en la evolución adquirieron la simetría pentámera.

Si bien no está claro qué llevó a estos animales a explorar el nuevo plan corporal, este debió aportar una ventaja: la posibilidad de interaccionar con el entorno en todas direcciones, lo que facilitaría la alimentación y la defensa contra los depredadores.

Los hallazgos fósiles demuestran que en el pasado existieron equinodermos asimétricos, bilaterales, helicoidales y pentarradiados; y todos surgieron más o menos a la vez. Este abanico de simetrías ha constituido durante largo tiempo uno de los principales enigmas evolutivos para los zoólogos y paleontólogos: ¿por qué los equinodermos primitivos presentaban simetrías tan variadas y los actuales solo la pentámera? Las primeras pruebas que arrojan luz sobre esta cuestión han llegado hace poco.

UN DESARROLLO MUY PARTICULAR

Una de las claves de la evolución de los equinodermos hacia una simetría pentámera reside en el desarrollo de sus larvas. El estudio de estas en los crinoideos y otros equinodermos ha proporcionado datos bastante concluyentes en este aspecto.

Como decíamos, todas las larvas de los deuteróstomos son bilaterales. Los hemicordados y cordados tenemos un desarrollo continuo, en el cual los embriones crecen de forma paulatina hasta construir un adulto bilateral. Los equinodermos, en cambio, hacen algo sorprendente y único: sus larvas (planctónicas, como la mayoría de las larvas de animales marinos) son también bilaterales pero, en un momento dado, se fijan sobre el sustrato por medio de la boca.

Para situar la boca en una posición más eficiente para alimentarse, la larva empieza a sufrir una metamorfosis muy compleja que empieza con la rotación de sus órganos principales y que supone incluso la supresión de algunas partes anatómicas. En la primera fase, la larva adquiere una forma asimétrica debido a la rotación de sus órganos principales. Finalmente, se desarrolla el adulto con una morfología y organización pentámera totalmente diferentes a las de la larva.

Las investigaciones sobre el desarrollo embrionario de los equinodermos indican, por tanto, que la simetría pentarradial es un rasgo que adquieren de manera secundaria; esta anatomía viene precedida de una fase larvaria bilateral a la que le sigue una fase asimétrica, que es consecuencia de la fijación de la larva al sustrato y de su posterior metamorfosis.

LAS PRUEBAS DEL PASADO

Otras pistas que han contribuido a aclarar la evolución de la simetría pentámera las han ofrecido los fósiles. La paleontología ha arrojado en los últimos años pruebas muy importantes sobre cómo fueron los primeros equinodermos. En concreto, dos yacimientos de edades muy parecidas en España y Marruecos han proporcionado fósiles de gran interés.

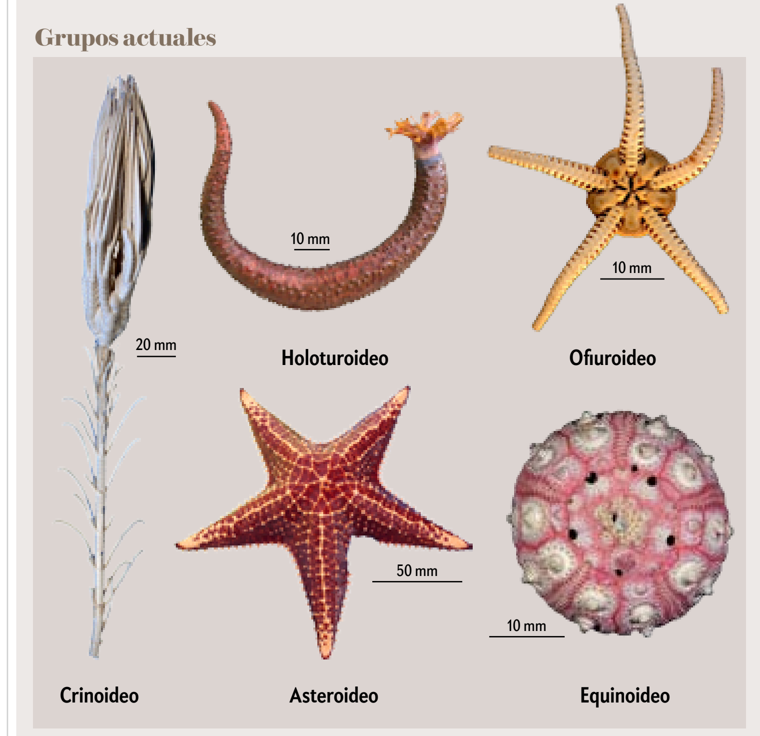
El primero de ellos fue descubierto por nuestro equipo en 2005 en el Parque Natural del Moncayo, junto al pequeño pueblo zaragozano de Purujosa. En esta zona, las rocas cámbricas son comunes y los fósiles se hallan bien conservados

DISTINTAS MORFOLOGÍAS

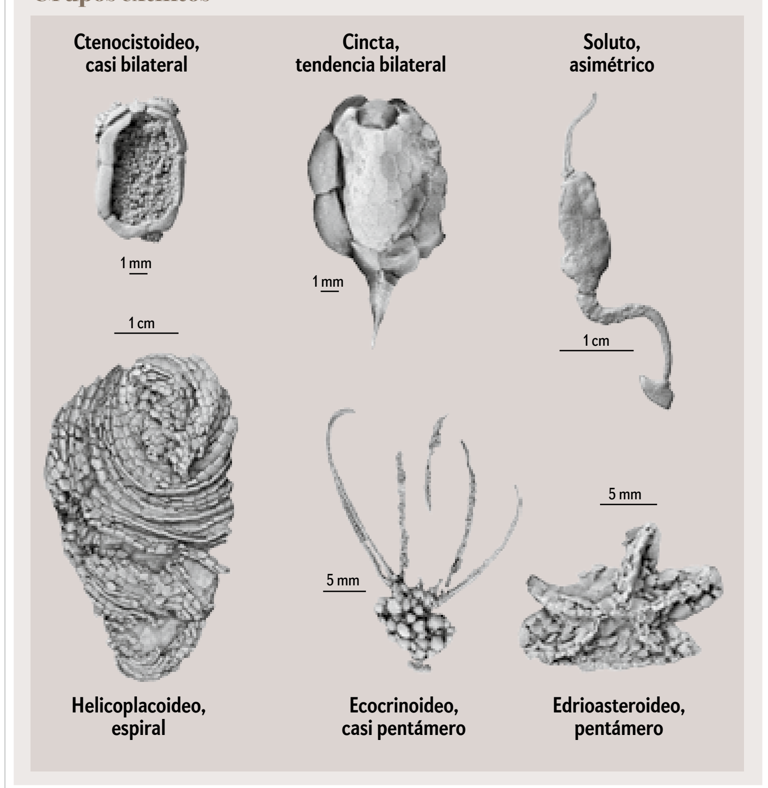
Equinodermos de ayer y de hoy

Mientras que todos los grupos actuales de equinodermos presentan simetría pentámera (*arriba*), los grupos primitivos extintos mostraban una diversidad de formas y tamaños mucho mayor y exhibían distintos planos corporales (*abajo*).

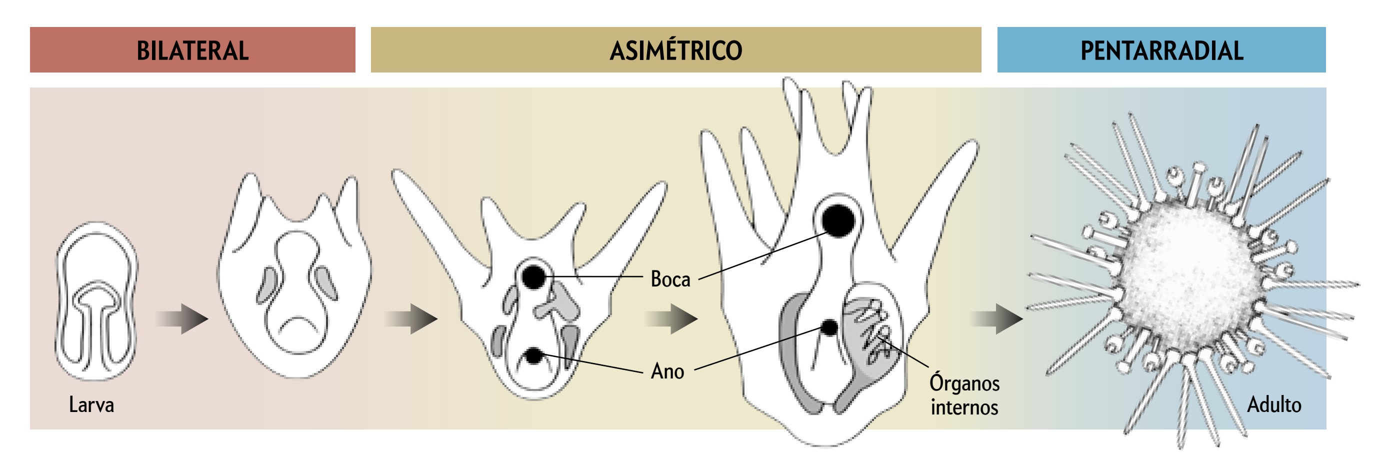
Grupos actuales



Grupos extintos



CORTESÍA DE ANDREW B. SMITH (*grupos actuales*); CORTESÍA DEL AUTOR (*grupos extintos*); WIKIMEDIA COMMONS/CC BY SA 3.0/A. ANTOLÍN MARTÍNEZ (*asteroideo*)



DURANTE EL DESARROLLO ONTOGENÉTICO, los equinodermos adoptan distintas formas. Las larvas, de simetría bilateral, pasan por una fase intermedia asimétrica, en la que se produce la rotación o eliminación de algunos de sus órganos, hasta adquirir su forma pentarradial adulta. Los estudios sobre la evolución del grupo hacen pensar que los equinodermos habrían experimentado una transformación similar a lo largo del tiempo.

CORTESÍA DE ANDREW B. SMITH

en lo que se conoce como Formación Murero (el proyecto homónimo se emprendió para estudiar los fósiles de esta formación en diferentes puntos de las Cadenas Ibéricas). Las excavaciones paleontológicas que allí vienen realizándose desde 2005 han cosechado varios cientos de fósiles de equinodermos, incluido un pequeño animal de dos centímetros al que bautizamos con el nombre de *Ctenoimbricata* (en referencia a la configuración imbricada de las placas que cubren la boca). La peculiaridad de este reside en su simetría bilateral, un rasgo totalmente novedoso, ya que hasta la fecha todos los fósiles descubiertos eran radiales o asimétricos.

El fósil fue analizado mediante microtomografía computarizada, una técnica novedosa que permite diseccionar el fósil en 3D sin destruirlo y con la que se obtiene un modelo tridimensional de la anatomía detallada del animal [*véase* «Microtomografías de invertebrados», por Javier Alba-Tercedor; Investigación y Ciencia, mayo de 2014].

Las microtomografías de *Ctenoimbricata* revelaron la presencia de una gran boca en la parte anterior cubierta por una serie de placas imbricadas en su parte dorsal. Justo debajo de la boca se aloja una serie de placas en forma de dientes, cuya función es rastrillar el fondo marino en busca de comida, lo que indica que su alimentación era principalmente detritívora (captaba partículas nutritivas del suelo marino).

Lo más reseñable de *Ctenoimbricata* es la posición que ocupa en el árbol evolutivo de los equinodermos. Tras realizar un análisis filogenético que incluía los principales linajes de equinodermos, llegamos a la conclusión de que el fósil representaba el equinodermo más basal. Se trataba de un avance importante, ya que nos ha ayudado a comprender el primer paso en la evolución del grupo.

El hallazgo del fósil refuerza la idea de que, al contrario de lo que se pensaba, los equinodermos fueron en sus orígenes bilaterales, lo mismo que sus larvas. También nos llamó la atención que *Ctenoimbricata* mostrara una alimentación principalmente detritívora, porque se creía que, igual que los crinoideos (los equinodermos actuales más primitivos), sería un animal suspensívoro, esto es, que se nutriría de las partículas presentes en la columna de agua.

Si los primeros equinodermos fueron bilaterales y no se asemejaban en nada a sus representantes actuales, sino más bien a un cordado primitivo, ¿cómo podemos saber que pertenecían en realidad al grupo de los equinodermos? La respuesta la hallamos en su singular tejido de sostén, el estereoma, y en los genes que controlan su formación.

Al contrario que numerosos grupos de invertebrados, que poseen exoesqueletos, los equinodermos presentan un esqueleto interno; este alberga los principales órganos y está formado por cientos de placas de calcita ensambladas por fibras de colágeno y que exhiben una microestructura muy particular conocida como estereoma. Mientras que la dura calcita otorga resistencia, las fibras de colágeno aportan flexibilidad.

Hasta hace poco estaba vigente una teoría que planteaba que la calcita estereómica era una característica primitiva de todos los cordados y equinodermos, y que solo los últimos la habían retenido hasta la actualidad. Sin embargo, los datos más recientes, obtenidos por David J. Bottjer, de la Universidad del Sur de California, y sus colaboradores a partir del estudio genético de varios grupos de deuteróstomos sugieren que su formación está controlada por una familia de genes presente solo en los equinodermos y no en los otros grupos de deuteróstomos. Aunque los fósiles cámbricos de equinodermos no conservan los genes, sí que contienen el esqueleto casi intacto. Varios estudios sobre la morfología de los primeros equinodermos han demostrado que las formas bilaterales y asimétricas ya tenían este tipo de esqueleto formado por calcita estereómica, lo que significa que la misma familia de genes que opera hoy en día en la formación del esqueleto lo hacía ya hace al menos 520 millones de años.

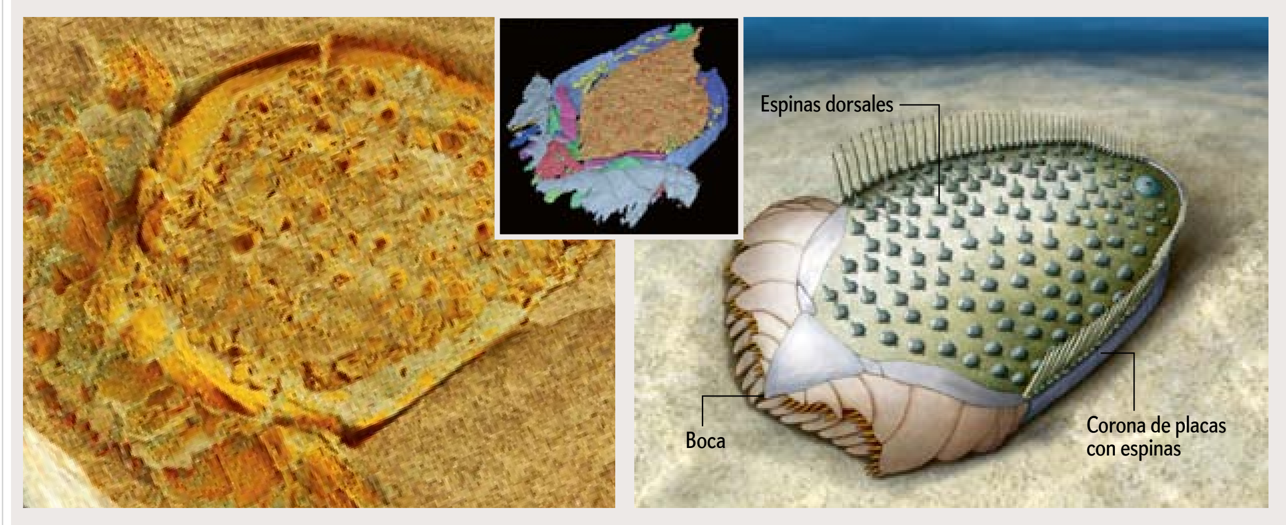
EQUINODERMOS ASIMÉTRICOS

Numerosos datos indican que la siguiente fase en la evolución de los equinodermos fue el desarrollo de un plan corporal asimétrico. Pero antes de llegar a esta conclusión, los paleontólogos han debatido durante décadas sobre el significado de unos extraños equinodermos conocidos con el nombre genérico de carpoideos u homalozoos. Sus fósiles son totalmente asimétricos y la interpretación sobre su origen ha despertado una fuerte controversia.

Los primeros carpoideos fueron descritos a finales de los años cincuenta del siglo xix por el paleontólogo canadiense Elkanah Billings y el geólogo francés Joachim Barrande. Inicialmente se

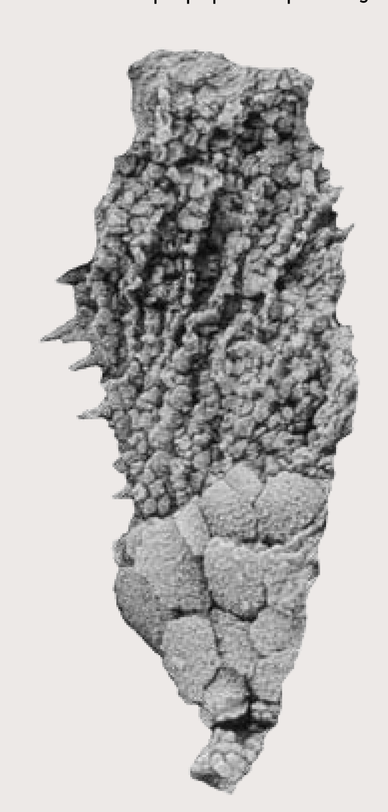
Dos fósiles que esclarecen la evolución de los equinodermos

Los fósiles *Ctenoimbricata* y *Helicocystis*, descubiertos por el autor y sus colaboradores en España y Marruecos, respectivamente, se han convertido en piezas clave para la reconstrucción de la historia evolutiva de los equinodermos. La descripción de su anatomía ha ofrecido pruebas reveladoras sobre la evolución de la simetría corporal del grupo, una transformación que conllevó cambios en la interacción de los animales con el entorno y, en especial, en su estrategia alimentaria. Abajo se muestran los fósiles de ambos equinodermos (*izquierda*) y la reconstrucción artística que se ha hecho de ellos (*derecha*).



Ctenoimbricata

Posee simetría bilateral. Su cuerpo, aplanado, se halla rodeado por un anillo de placas calcíticas en forma de corona, sobre el cual aparece una línea de espinas defensivas. La parte dorsal está cubierta también por pequeñas espinas. Seguramente tenía poca capacidad de movimiento, ya que carece de apéndices locomotores. La microtomografía computarizada (*inserto*) revela la posición anterior de la boca y permite deducir que presentaba alimentación detritívora (basada en los detritos del fondo marino).

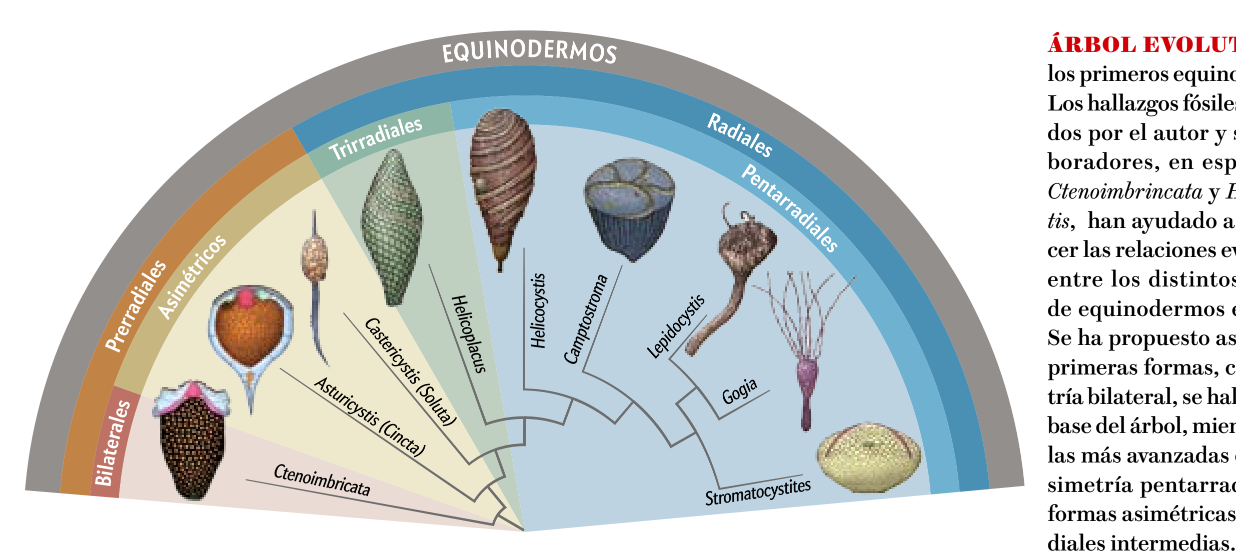




Helicocystis

Tiene forma espiral y un plan corporal pentarradiado. La boca se sitúa en la parte superior del cuerpo y de ella irradian cinco estructuras alimentarias, o ambulacros, que constituyen otro de los rasgos distintivos de los equinodermos. Una de las características más relevantes es la zona inferior en forma de copa, que alberga parte de los órganos. Desde esta copa se prolonga un pequeño pedúnculo cuya función era mantener al organismo anclado sobre el fondo marino. Esta anatomía hace pensar que presentaba una alimentación suspensívora (basada en la filtración del agua marina), que le permitiría explotar los recursos alimentarios a profundidades mucho más variadas que *Ctenoimbricata*.

FUENTE: «PLATED CAMBRIAN BILATERIANS REVEAL THE EARLIEST STAGES OF ECHINODERM EVOLUTION» POR S. ZAMORA ET AL. EN *PLOS ONE*, VOL. 7, N.º 6, 2012 (*Ctenoimbricata*); «CAMBRIAN SPIRAL-PLATED ECHINODERMS FROM GONDWANA CAPTURE THE BEGINNINGS OF PENTARRADIALITY», POR A. B. SMITH Y S. ZAMORA EN *PROCEEDINGS OF THE ROYAL SOCIETY B*, VOL. 280: 20131197, 2013 (*Helicocystis*)



ÁRBOL EVOLUTIVO de los primeros equinodermos. Los hallazgos fósiles realizados por el autor y sus colaboradores, en especial de *Ctenoimbrincata* y *Helicocystis*, han ayudado a establecer las relaciones evolutivas entre los distintos grupos de equinodermos extintos. Se ha propuesto así que las primeras formas, con simetría bilateral, se hallan en la base del árbol, mientras que las más avanzadas exhibían simetría pentarradial, con formas asimétricas y trirradiales intermedias.

CORTESÍA DEL AUTOR

pensó que debían incluirse en un grupo extinto de equinodermos, los cistoideos. Conforme aparecieron más fósiles, empezó a pensarse que estos animales eran únicos y diferentes de todo lo conocido hasta la fecha. Muchos investigadores de principios del siglo xx los consideraron grupos de equinodermos primitivos que precedieron a los equinodermos radiales, visión que fue reflejada en la edición del año 1968 del *Treatise on invertebrate paleontology* («Tratado de paleontología de los invertebrados»), la biblia de los paleontólogos de invertebrados publicada por la Sociedad Geológica de América desde 1953.

Hacia la misma fecha, se formuló una hipótesis alternativa que causó un tremendo impacto en la comunidad científica. El paleontólogo británico Richard Jefferies, del Museo de Historia Natural de Londres, publicó una serie de trabajos sobre los estilóforos, un grupo de carpoideos. Basándose en un estudio anterior del zoólogo sueco Torsten Gislén, descubrió una serie de semejanzas entre los carpoideos y los cordados que le llevaron a proponer que los carpoideos eran ancestros directos de estos. Si ello resultara cierto, nuestros antepasados más remotos tuvieron un esqueleto de calcita y fueron asimétricos.

Una tercera hipótesis, mucho más reciente, ha planteado que los carpoideos fue un grupo de equinodermos muy modificado (derivado) que perdió su condición radial.

En la actualidad, y gracias al hallazgo de nuevos fósiles, sabemos que los carpoideos representan diferentes linajes de equinodermos que en ocasiones poco tienen que ver unos con otros. En concreto, dos grupos de carpoideos, denominados Cincta y Soluta nos ayudan a completar la historia evolutiva de los equinodermos. Ambos representan el paso intermedio entre los equinodermos bilaterales y los primeros que presentaron simetría radial. Los cincta poseían un cuerpo aplanado, rodeado por un anillo de placas calcíticas rectangulares y la boca alojada en la parte derecha frontal del anillo. Los solutos, muy asimétricos, poseían un cuerpo globoso formado por múltiples placas, un único apéndice anterior dedicado a la alimentación (brazo) y otro posterior relacionado con la locomoción y la estabilización sobre el sustrato (*véase el recuadro* «Equinodermos de ayer y de hoy»).

EL ORIGEN DE LA SIMETRÍA PENTÁMERA

El segundo fósil importante al que me refería más arriba y que ha ayudado de forma destacada a construir el puzle de la evolución de los equinodermos fue hallado en las montañas del Anti-Atlas en Marruecos, durante una expedición que realicé en 2011 junto con Andrew Smith, del Museo de Historia Natural de Londres. Se trata de una zona excepcional para el estudio del Cámbrico, ya que proporciona grandes extensiones de roca de esta edad, sin apenas vegetación que cubra los afloramientos; los fósiles son muy comunes y se hallan muy bien conservados.

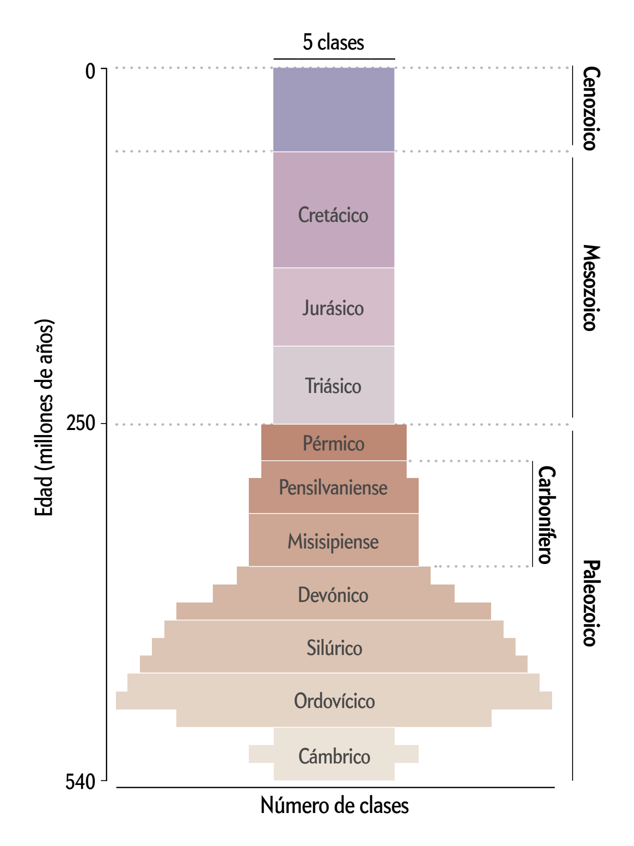
Cerca de un pequeño oasis en una villa llamada Tarhia, en la formación rocosa Jbel Wawrmast, descubrimos unos fósiles únicos que denominamos *Helicocystis* por su forma helicoidal. Con una longitud de apenas unos pocos centímetros, lo que más llamaba la atención era su forma espiral. De nuevo, no se conocía nada parecido, a excepción de unos fósiles hallados en Norteamérica hace más de medio siglo y que se denominan helicoplacoideos.

Un aspecto notable de *Helicocystis* es que su cuerpo se hallaba dividido en cinco partes o radios, como los equinodermos actuales; además, igual que los crinoideos, vivía fijo al sustrato mediante un pedúnculo y se alimentaba filtrando las partículas en suspensión del agua marina.

Pero el paso de la fase asimétrica a la pentarradial no fue directo. Así lo indican los fósiles de los helicoplacoideos, que son helicoidales pero su cuerpo solo presenta tres radios, no cinco como *Helicocystis*. Además, su boca se halla en posición lateral, no superior, y carecen de un pedúnculo bien desarrollado. Al parecer, los helicoiplacoideos representan un paso intermedio entre los equinodermos asimétricos y los propiamente pentarradiales. Algunos investigadores han interpretado que la boca situada en la parte lateral del cuerpo está migrando hacia la parte superior, tal y como ocurre en el desarrollo de las larvas de los equinodermos actuales.

AUGE Y DECLIVE DE LOS EQUINODERMOS

Si bien la adquisición de la simetría pentámera fue el hito más notable en la evolución de los equinodermos, todavía se sabe muy poco sobre qué motivó su aparición. Todos los grupos actuales son pentarradiales (aunque algunos adquirieron la bilateralidad de modo secundario, como los erizos de mar irregulares), y también la mayoría de los grupos fósiles. Los equinodermos pentámeros dominaron los mares a partir del Cámbrico, lo que demuestra el gran éxito evolutivo de este plan corporal. Algunos autores proponen que la simetría pentámera otorgó ventajas



LA DIVERSIDAD DE EQUINODERMOS ha experimentado cambios profundos a lo largo del tiempo. En este gráfico se muestra cómo ha variado el número de clases a través de las etapas geológicas. Mientras que a finales del Cámbrico se produjo una expansión y diversificación de formas, las extinciones del Ordovícico y del Pérmico terminaron con la mayoría de los grupos y solo se conservaron los de simetría pentámera.

GRÁFICO REDIBUJADO A PARTIR DE LOS DATOS DE JAMES SPRINKLE, UNIVERSIDAD DE TEJAS, EE.UU.

evolutivas muy notables a los equinodermos al permitirles interactuar con el medio marino en todas direcciones sin necesidad de girar el cuerpo. Asimismo, los equinodermos radiales presentaban principalmente una alimentación suspensívora que les permitía explotar recursos a distintas profundidades, mientras que en las formas prerradiales (asimétricas y bilaterales) predominaba la alimentación detritívora, más limitada al fondo marino.

Los paleontólogos conocemos, gracias el estudio de los fósiles, que las extinciones acontecidas durante el pasado han desempeñado una función fundamental en la evolución de los organismos, porque han mermado su diversidad pero también han ofrecido nuevas oportunidades al permitir que grupos oportunistas aprovecharan la existencia de nichos vacíos para expandirse y diversificarse.

Las extinciones ocurridas durante el Paleozoico modelaron en gran medida la diversidad de los equinodermos. Durante el Cámbrico, el tipo de alimentación más común entre ellos era la detritívora, y numerosos grupos bilaterales y asimétricos se nutrían de partículas orgánicas en la interfase agua-sedimento. Los primeros equinodermos radiales ya evolucionaron hacia un nuevo tipo de alimentación, la filtradora, y captaban partículas en suspensión de la columna de agua. Estos primeros organismos radiales, que vivieron en aguas tranquilas, presentaban un tamaño muy reducido. Su cuerpo se elevaba sobre el sustrato gracias a la presencia de un pequeño pedúnculo formado primero por placas irregulares y después por anillos (columnares).

A finales del Cámbrico varios factores, entre ellos la aparición de nuevos hábitats en las zonas marinas someras, favorecieron la migración de un gran número de equinodermos radiales a estas zonas. Ello les permitió expandirse por diferentes regiones geográficas y diversificarse con gran rapidez. Sin embargo las formas prerradiales, que se alimentaban en la interfase agua-sedimento, casi desaparecieron, seguramente por la competencia que establecieron con ellos otros grupos mucho más eficientes y con mayor capacidad de movimiento. Mientras que los primeros equinodermos radiales eran de tamaño muy reducido, apenas un par de centímetros, sus descendientes poscámbricos llegaron a alcanzar varios metros de longitud y fueron capaces de filtrar las partículas sedimentarias a diferentes alturas.

A finales del Ordovícico otra gran extinción, esta vez producida por un gran cambio climático que desembocó en una gran glaciación, también acabó con una parte importante de las especies de equinodermos. Esta vez afectó sobre todo a las formas que se desarrollaban en arrecifes poco profundos y que se habían expandido gracias a un calentamiento global. La extinción hizo desaparecer estos arrecifes y mucha de su fauna, incluidos varios grupos de equinodermos.

Finalmente, la extinción más devastadora de todas, ocurrida a finales del Pérmico y que terminó con el 96 por ciento de la fauna marina mundial, culminó con la desaparición de gran parte de los equinodermos típicos del Paleozoico. En la actualidad, observamos solo una pequeña parte de esa diversidad del pasado. De los casi veinte grandes grupos (clases) que llegaron a existir durante el Ordovícico, únicamente cinco perduran hoy en nuestros mares.

La próxima vez que contemplemos una estrella o erizo de mar en la playa, quizá recordemos que su forma tan peculiar es el resultado de más de 500 millones de años de evolución. Su simetría pentámera, tan familiar para todos, es consecuencia de una compleja transformación de un cuerpo originariamente bilateral, como el nuestro.

PARA SABER MÁS

Paleogenomic of echinoderms. David J. Bottjer et al. en *Science*, vol. 314, págs. 956-960, 2006.
Equinodermos del Cámbrico de España: Situación actual de las investigaciones y perspectivas futuras. S. Zamora en *Estudios Geológicos*, vol. 67, n.º 1, págs. 59-81, 2011.
Plated Cambrian bilaterians reveal the earliest stages of echinoderm evolution. S. Zamora, I. A. Rahman y A. B. Smith en *PLoS One*, vol. 7, n.º 6, 2012.
Cambrian spiral-plated echinoderms from Gondwana capture the beginnings of pentarradiality. A. B. Smith y S. Zamora en *Proceedings of The Royal Society B*, vol. 280: 20131197, 2013. **dx.doi.org/10.1098/rsbp.2013.1197**
Progress in echinoderm palaeobiology. Dirigido por S. Zamora e I. Rábano. Cuadernos del Museo Geominero n.º 19. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 2015.
Página web del Proyecto Murero: **wzar.unizar.es/murero**

EN NUESTRO ARCHIVO

La edad de oro de la evolución animal. Jeffrey S. Levinton en *IyC*, enero de 1993.
Orígenes de la complejidad animal. David J. Bottjer en *IyC*, octubre de 2005.
Desarrollo embrionario y evolución. K. E. Willmore en *IyC*, septiembre de 2010.

SISTEMA SOLAR

EL OCÉANO CALIENTE DE ENCÉLADO

Bajo la capa de hielo del pequeño satélite de Saturno se esconde una gran masa de agua con actividad hidrotermal. ¿Se dan allí condiciones aptas para la vida?

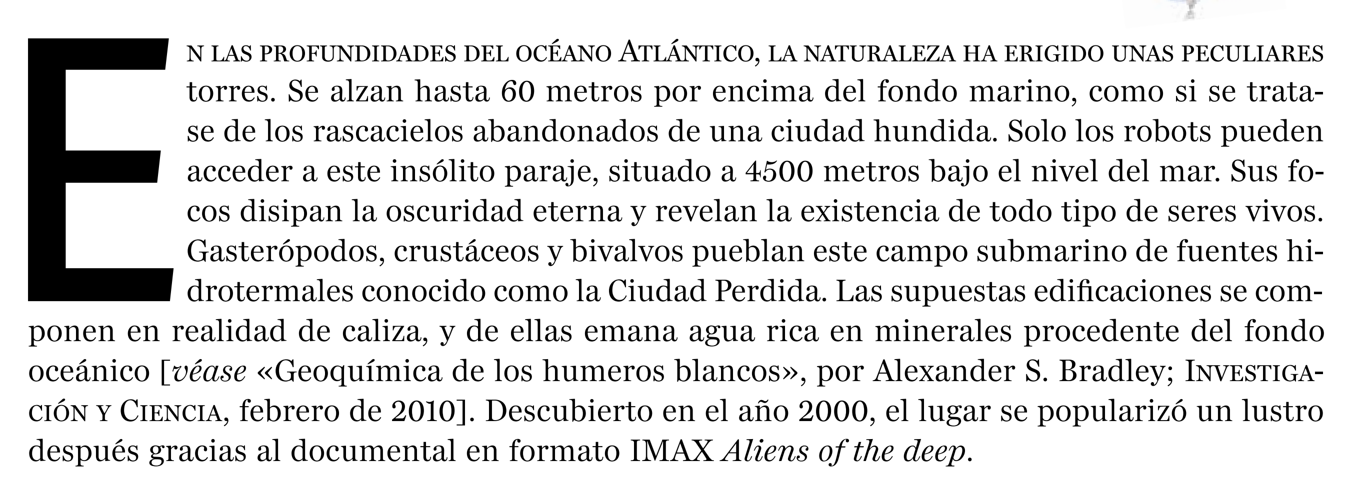
Frank Postberg y Thorsten Dambeck



ACTIVIDAD GEOLÓGICA: Desde las fisuras situadas en el polo sur de Encélado, el satélite de Saturno, emanan chorros de partículas de hielo procedentes del agua líquida que yace bajo su corteza helada. Esta fotografía fue tomada por las cámaras de *Cassini*, la sonda que desde 2004 estudia el gigante gaseoso y sus lunas.

Frank Postberg es miembro del equipo científico de la misión Cassini, donde dirige los análisis de espectrografía de masas a partir de los datos del Analizador de Polvo Cósmico. Pertenece al Instituto de Geociencias de la Universidad de Heidelberg y al Instituto de Sistemas de Navegación Espacial de la Universidad de Stuttgart.

Thorsten Dambeck es doctor en física y periodista científico especializado en planetología y astronomía.



En las profundidades del océano Atlántico, la naturaleza ha erigido unas peculiares torres. Se alzan hasta 60 metros por encima del fondo marino, como si se tratase de los rascacielos abandonados de una ciudad hundida. Solo los robots pueden acceder a este insólito paraje, situado a 4500 metros bajo el nivel del mar. Sus focos disipan la oscuridad eterna y revelan la existencia de todo tipo de seres vivos. Gasterópodos, crustáceos y bivalvos pueblan este campo submarino de fuentes hidrotermales conocido como la Ciudad Perdida. Las supuestas edificaciones se componen en realidad de caliza, y de ellas emana agua rica en minerales procedente del fondo oceánico [*véase* «Geoquímica de los humeros blancos», por Alexander S. Bradley; Investigación y Ciencia, febrero de 2010]. Descubierto en el año 2000, el lugar se popularizó un lustro después gracias al documental en formato IMAX *Aliens of the deep*.

Además de entusiasmar al público y a los expertos en biología marina, el peculiar biotopo de la Ciudad Perdida ha despertado el interés de otra comunidad: la de planetólogos. Varias investigaciones recientes han demostrado que sus condiciones fisicoquímicas se asemejan a las del lecho oceánico que, gracias a los datos enviados durante los últimos años por la sonda *Cassini*, sabemos que existe en las profundidades de Encélado, una de las lunas de Saturno.

De entre los más de sesenta satélites conocidos del gigante gaseoso, Encélado, con un diámetro medio de 504 kilómetros, posee un tamaño más bien modesto. Descubierto por William Herschel en 1789, este pequeño mundo no pasó de ser un mero punto de luz en los telescopios hasta que fue fotografiado por las sondas *Voyager* en los años ochenta. La pequeña luna se encuentra completamente cubierta de hielo, cuya elevada reflectividad, mayor incluso que la de la nieve recién caída, otorga a su superficie un intenso brillo.

También su órbita resulta llamativa. Encélado surca el anillo E de Saturno, muy difuso y apartado del sistema de anillos principales del gigante gaseoso. Hoy estos últimos pueden contemplarse con un telescopio de aficionado. El E, sin embargo, pasó inadvertido hasta 1966, cuando fue descubierto mediante observaciones efectuadas desde la superficie terrestre. En la era de las sondas espaciales, este anillo ha adquirido protagonismo gracias a Encélado.

En verano de 2004, y tras casi siete años de vuelo, la sonda estadounidense-europea *Cassini-Huygens* llegó a Saturno. La nave más cara y pesada que jamás se haya lanzado al sistema solar exterior ha desempeñado hasta ahora su cometido con gran éxito. La misión se ha ampliado en varias ocasiones, por lo que hace ya una década que sus instrumentos estudian el planeta, sus anillos y sus lunas.

Las observaciones de Encélado, en particular, cayeron como una bomba sobre la comunidad científica. En 2005 se detectaron en las inmediaciones de la luna helada ciertas alteraciones del campo magnético de Saturno, lo que revelaba una fuerte actividad geológica. Meses después se halló una de las manifestaciones visibles de dicha actividad: un potente penacho eruptivo, solo visible a contraluz, que se alzaba cientos de kilómetros sobre la superficie del satélite. Procedía de una región próxima al polo sur, donde unas enormes grietas abiertas en la corteza helada expulsaban chorros de vapor de agua y partículas de hielo.

Algunos expertos conjeturaron enseguida que aquellos chorros tal vez se alimentasen de agua líquida. De ser el caso, esta debía hallarse bajo las Rayas de Tigre, un sistema de fosas

EN SÍNTESIS

Encélado, la pequeña luna de Saturno, arroja al espacio enormes chorros de vapor de agua y cristales de hielo que, posteriormente, se incorporan al extenso anillo E del gigante gaseoso. El agua proviene de un océano salado oculto bajo el hielo del satélite.

Las nanopartículas de dióxido de silicio analizadas por el detector de polvo de la sonda *Cassini* han revelado que, en el lecho oceánico, las temperaturas superan los 90 grados Celsius y alcanzan valores que tal vez lleguen a los 200 grados. El *p*H presenta valores alcalinos.

Un número creciente de investigadores considera que, en la Tierra, la vida pudo originarse en regiones del fondo oceánico con condiciones muy similares a las inferidas en las aguas de Encélado. Ello ha puesto a la distante luna en el punto de mira de los astrobiólogos.

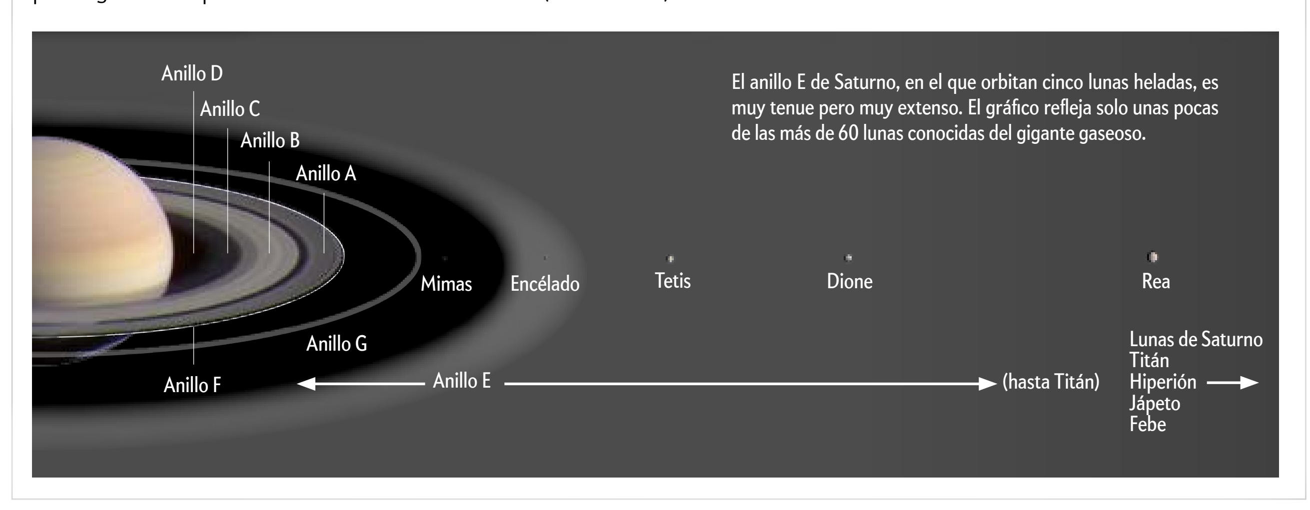
PÁGINAS ANTERIORES: NASA/JPL/SSI/EMILY LAKDAWALLA; ADAPTADO POR *SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*

«E» de Encélado

El difuso anillo E es el más exterior y el más extenso de los anillos de Saturno. Estos recibieron sus nombres por el orden en que fueron descubiertos. Del interior al exterior, son el D, C, B, A, F, G y, finalmente, el E, avistado por primera vez por el astrónomo estadounidense Walter Feibelman en 1966. Aquel año, los anillos principales, mucho más luminosos pero extremadamente planos, se mostraban de perfil, por lo que apenas podían apreciarse. Esas condiciones permitieron que el azulado anillo E despuntase en el telescopio tras un tiempo prolongado de exposición. A diferencia de los principales, el E no contiene partículas de polvo de gran tamaño, por lo que las sondas espaciales pueden atravesarlo sin peligro.

Los datos obtenidos in situ por el detector de polvo CDA de la sonda *Cassini* revelaron que la mayoría de las partículas del anillo E no superaban las dos micras. Este anillo alcanza, además, una gran extensión, tal y como indican los telescopios o la propia cámara de *Cassini*. Gracias a las mediciones del CDA, se sabe que se prolonga incluso más allá de la órbita de Titán, el mayor satélite de Saturno (*no mostrado*).

La región más brillante del anillo E se localiza a unos 235.000 kilómetros del gigante gaseoso, lo que equivale a 3,9 veces el radio del planeta. Dado que Encélado orbita casi en la misma zona, los expertos sospechaban, ya antes del descubrimiento de las erupciones de hielo, que el anillo E y Encélado se influenciaban mutuamente. A diferencia de los anillos principales, el E se extiende también en la dirección perpendicular al plano del anillo, una circunstancia que obedece a las órbitas inclinadas de las partículas que lo componen. Su espesor aumenta con la distancia a Encélado.



El anillo E de Saturno, en el que orbitan cinco lunas heladas, es muy tenue pero muy extenso. El gráfico refleja solo unas pocas de las más de 60 lunas conocidas del gigante gaseoso.

ramificadas casi paralelas y de hasta 130 kilómetros de longitud que surcan el hielo de Encélado en la zona de su polo austral. No obstante, la idea de que pudiese haber agua líquida tan lejos del Sol no tardó en ser objeto de críticas, ya que la temperatura media en el sistema de Saturno alcanza los 200 grados Celsius bajo cero. Al fin y al cabo, la existencia de los chorros podía explicarse a partir de la sublimación del hielo en las Rayas de Tigre o mediante la liberación explosiva de gases previamente capturados en forma de clatratos; es decir, encerrados en «jaulas» moleculares de hielo.

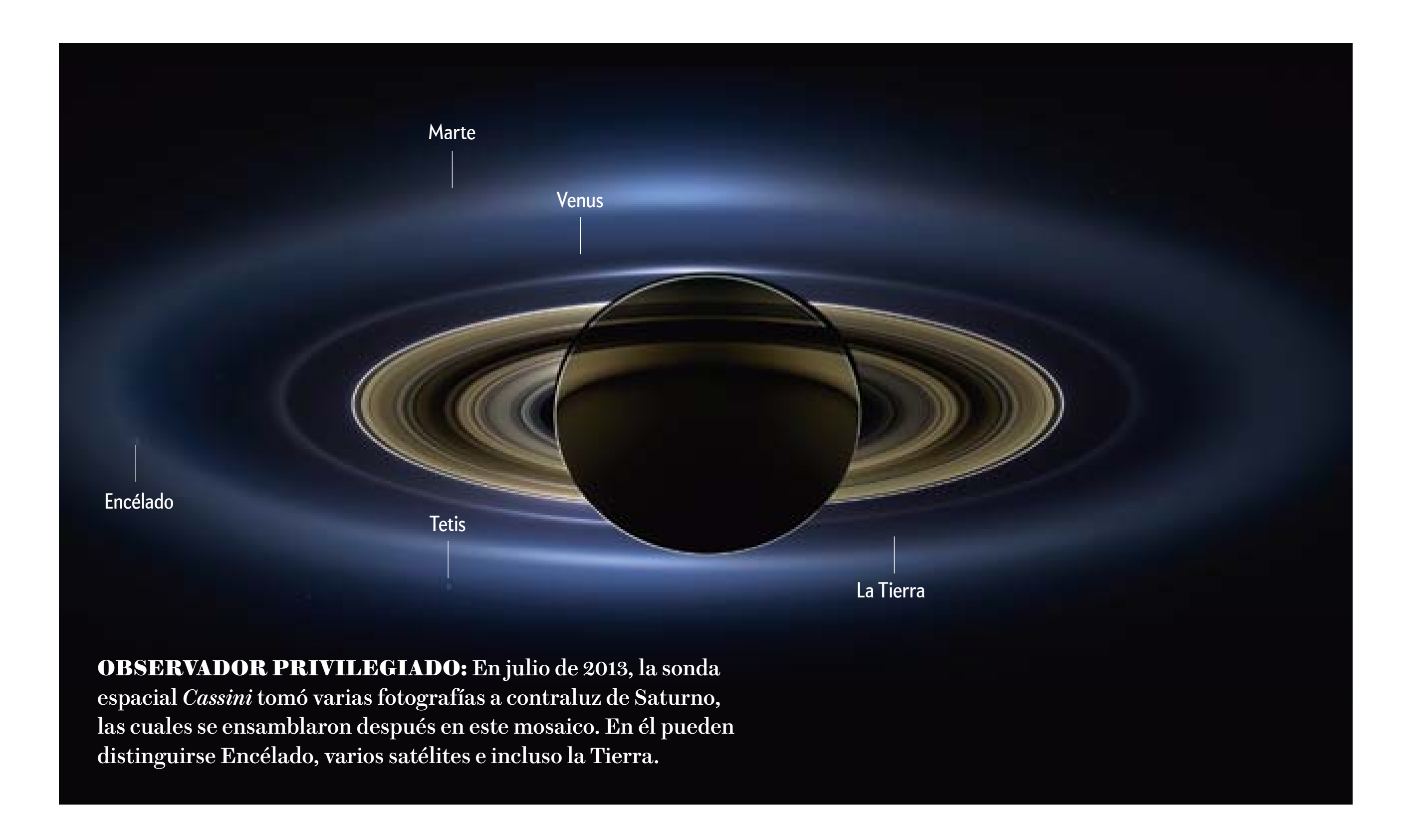
TRAS LAS HUELLAS DE UN OCÉANO OCULTO

Sin embargo, los datos obtenidos desde entonces por *Cassini* han certificado que, en efecto, Encélado esconde un océano de agua líquida bajo su superficie helada. Durante tres sobrevuelos efectuados entre 2010 y 2012, los investigadores siguieron con detalle las señales de radio emitidas por la sonda. Debido a las variaciones del campo gravitatorio del satélite, dichas señales experimentan ligeras alteraciones a lo largo de la trayectoria de sobrevuelo, lo que a la postre permite inferir la distribución de masa de la luna. El grupo de Luciano Iess, de la Universidad de Roma, detectó una anomalía gravimétrica en la región del polo sur cuya única explicación era la existencia de una zona de mayor densidad bajo el suelo helado. Debía por tanto tratarse de agua líquida, más densa que el hielo. Los investigadores, que en 2014 publicaron sus resultados en la revista *Science*, interpretaron aquellos datos como un indicio indirecto de la existencia de un océano profundo.

Según sus conclusiones, el océano de Encélado se halla a unos 30 o 40 kilómetros bajo la corteza de hielo y presenta un espesor de unos 10 kilómetros. Sus aguas se extienden probablemente en todas direcciones desde el polo meridional hasta los 50 grados de latitud sur, si bien los datos no descartan un océano profundo en todo el satélite. En cualquier caso, aunque se limitase a la región austral, el mar oculto de Encélado albergaría unas 250 veces más agua que el lago Constanza, uno de los mayores de Europa.

Con todo, la pista clave sobre la existencia de un mar oculto en Encélado fue obtenida en 2009 por otro instrumento a bordo de *Cassini*, el Analizador de Polvo Cósmico (CDA, por sus siglas en inglés). Desarrollado en el Instituto Max Planck de Física Nuclear de Heidelberg y controlado desde el Instituto de Sistemas de Navegación Espacial de la Universidad de Stuttgart por un equipo al que pertenece uno de nosotros (Postberg), este dispositivo fue diseñado para estudiar las partículas de polvo de escala micrométrica que abundan en el sistema solar.

El CDA analizó el polvo interplanetario en las proximidades de Saturno, compuesto en su mayor parte por hielo de



OBSERVADOR PRIVILEGIADO: En julio de 2013, la sonda espacial *Cassini* tomó varias fotografías a contraluz de Saturno, las cuales se ensamblaron después en este mosaico. En él pueden distinguirse Encélado, varios satélites e incluso la Tierra.

NASA/JPL-CALTECH/SSI

agua. Al hacerlo, comprobó que un gran número de partículas presentaban un alto contenido en sales, lo que apuntaba a una reserva de agua líquida en Encélado. Dichas partículas habrían sido catapultadas desde los chorros del polo sur hacia el anillo E de Saturno. A lo largo de su órbita, el satélite deja un rastro de partículas de hielo que alimentan el anillo E, que sin dicha reposición tardaría mil años como mucho en desaparecer. Sin embargo, solo una fracción de las partículas expulsadas alcanza el anillo; las más lentas caen de nuevo y se depositan sobre la luna helada en forma de «nieve» fina. Como consecuencia, el hemisferio sur presenta extensas regiones parcialmente cubiertas por una capa de nieve de más de cien metros de espesor.

El análisis de las partículas de hielo efectuado en 2009 demostró, además, que las sales de su interior procedían del núcleo rocoso del satélite. La conclusión parecía clara: el océano interior se encontraba en contacto físico con el núcleo de Encélado. Aquel descubrimiento revestía suma importancia, ya que el agua solo puede actuar como elixir de la vida si es capaz de disolver minerales y establecer así una química prebiótica. En 2014, los análisis gravimétricos del satélite también confirmaron que el agua y la roca se hallaban en contacto.

Para los astrobiólogos, el descubrimiento de agua salada promocionó a Encélado a la primera división de los cuerpos celestes de interés, ya que hacía de él un mundo potencialmente habitable. Como resultado, el pequeño satélite se convirtió en uno de los más estudiados del sistema solar. *Cassini* lo ha sobrevolado ya en 21 ocasiones y se ha aproximado a sus desiertos de hielo a una distancia de tan solo 25 kilómetros. Su interior se asemeja al de Europa, la luna de Júpiter, bajo cuyo caparazón helado los investigadores también han intuido la existencia de un gran océano global. Por otro lado, tanto el CDA como el Espectrómetro de Masas Neutras e Iones (INMS), otro instrumento de *Cassini*, han detectado sustancias orgánicas relativamente complejas en el hielo y el gas procedentes de los chorros.

PROCESOS HIDROTERMALES

Los últimos análisis del CDA, publicados por Postberg y sus colaboradores hace pocos meses en *Nature*, han vuelto a asombrarnos. El fondo oceánico de Encélado probablemente sea el escenario de procesos hidrotermales, ya que en la zona de contacto entre el agua y el núcleo rocoso predominan un *p*H alcalino y unas temperaturas de al menos 90 grados Celsius, las cuales podrían alcanzar incluso los 200 grados.

Nuestro conocimiento sobre la superficie de contacto entre el océano y el núcleo de Encélado procede de los datos del CDA, que puede analizar nanopartículas cien veces menores que los gránulos de hielo y que, a menudo, solo constan de unos pocos miles de átomos. Combinar esas mediciones con los resultados del grupo de Yasuhito Sekine, de la Universidad de Tokio, donde se reproducen las condiciones de las profundidades oceánicas en estudios geoquímicos de laboratorio, ha permitido extraer las siguientes conclusiones:

Las nanopartículas analizadas proceden de Encélado. Aunque, en principio, las diminutas partículas se encontrarían por debajo del umbral de medición del detector de polvo, pueden observarse gracias a su elevada velocidad de impacto. Hsiang-Wen Hsu, de la Universidad de Colorado en Boulder, estudió sus trayectorias mediante dos simulaciones numéricas complementarias. Mediante una «simulación inversa» recreó la trayectoria de las partículas hasta su lugar de origen, para lo cual empleó los datos de *Cassini* sobre el viento solar, donde las nanopartículas con carga eléctrica se mezclan una vez que abandonan la magnetosfera de Saturno. Después verificó los resultados con un «modelo de eyección». Este último debía describir de forma realista, entre otras cosas, los procesos por

los que las partículas adquirían carga eléctrica en la zona de electrones e iones que *Cassini* había detectado en los alrededores de Saturno. Ambos métodos coincidían en que el radio de las nanopartículas oscilaba entre dos y ocho nanómetros y, sobre todo, en que eran expulsadas al espacio interplanetario desde la región externa del anillo E. Por otra parte, se sabe que el material de este anillo procede de Encélado, por lo que las nanopartículas debían haberse originado en la luna helada.

Las partículas se componen de dióxido de silicio. A fin de reducir el ruido estadístico y reforzar la señal, Postberg superpuso 32 espectros de nanopartículas en los que estas habían dejado una señal especialmente nítida y obtuvo un único espectro suma. Sus resultados indican que lo más probable es que las partículas se compongan de dióxido de silicio (SiO_2) casi puro. Este material, sin embargo, no es en absoluto característico del núcleo rocoso de un cuerpo planetario. En las rocas más primitivas de Encélado cabría esperar silicatos metálicos, como el olivino o el piroxeno, que, además de silicio, contienen hierro y magnesio. El SiO_2 sin contenido metálico solo puede formarse mediante la interacción de tales rocas primordiales con agua caliente.

En la Tierra, el proceso de formación del SiO_2 no metálico se conoce gracias al estudio de las fuentes hidrotermales de Islandia, las cuales son excepcionalmente intensas y contienen agua caliente enriquecida con SiO_2. Cuando se enfría, el SiO_2 precipita y, en un primer momento, flota en forma de pequeñas partículas. A continuación se agregan más moléculas y las partículas se tornan más pesadas, por lo que finalmente se hunden. Así ocurre a menos que se trate de un ambiente alcalino y con escasas sales, lo que inhibe el proceso de crecimiento.

Los experimentos confirman la formación de partículas de SiO_2 en aguas profundas. Tras años de trabajo de laboratorio, nuestros colegas japoneses dilucidaron los procesos de formación de las nanopartículas de SiO_2. En el Instituto de Ciencias Marinas de Kashiwa, a unos kilómetros de Tokio, los investigadores reprodujeron las condiciones del océano lunar en recipientes con agua a presión donde introdujeron sales de sodio y amoníaco, cuya presencia se había detectado en los gases expulsados por Encélado. Ajustaron la cantidad total de sustancias disueltas a un valor realista y, a fin de remedar el efecto del núcleo rocoso de Encélado, pusieron la solución en contacto con distintas mezclas de olivino y piroxeno. Las muestras se dejaron evolucionar durante períodos de entre seis y nueve meses y el experimento se repitió a temperaturas de entre 100 y 300 grados Celsius.

Los resultados fueron esclarecedores. En los océanos simulados se disolvía el SiO_2, cuya concentración los investigadores determinaron a partir de minerales secundarios derivados de las reacciones de las rocas primordiales con el agua caliente. Cuando la temperatura disminuía (lo que correspondería a su ascenso por las frías aguas de Encélado), la solución se sobresaturaba en SiO_2. Este precipitaba en forma de nanopartículas cuyo tamaño aumentaba debido al *p*H alcalino de la solución, pero no llegaba a formar granos macroscópicos. A partir de ahí puede extrapolarse que la temperatura del agua en la superficie del núcleo rocoso de Encélado debe alcanzar, al menos, los 90 grados Celsius, ya que a temperaturas inferiores no se disolvería suficiente SiO_2 (que, por tanto, tampoco podría formarse durante el enfriamiento posterior). De hecho, es posible que la temperatura del agua supere holgadamente los 200 grados.

En el océano de Encélado tienen lugar intensos procesos de circulación. En un principio, en los experimentos se formaban partículas de SiO_2 de unos dos nanómetros de radio. El tamaño típico de los miles de nanopartículas procedentes de Encélado medidas con el CDA variaba entre dos y ocho nanómetros, y en ningún caso superaba los diez. Tanto los ensayos de laboratorio como los estudios teóricos de nuestros colaboradores japoneses muestran que las partículas iniciales de dos nanómetros se forman al cabo de unos meses, mientras que las de mayor tamaño tardan como máximo unos pocos años.

De lo anterior podemos extraer dos conclusiones importantes. En primer lugar, que las partículas observadas por el CDA tuvieron que generarse poco antes de su detección, pues de lo contrario presentarían tamaños mayores. Por tanto, no se deben a una actividad hidrotermal pasada, sino a procesos actuales. En

EL ANALIZADOR DE POLVO DE *CASSINI*

Sales de un mar extraterrestre

Cuando la sonda espacial *Cassini* cruza la trayectoria de una partícula de polvo, se activa el Analizador de Polvo Cósmico (CDA). Este dispositivo puede detectar elementos químicos y moléculas de hasta 200 veces la masa del átomo de hidrógeno y estudiar su composición.

El instrumento, de 17 kilogramos de peso, es controlado desde el Instituto de Sistemas de Navegación Espacial de la Universidad de Stuttgart. En su interior se halla fijada una placa de rodio; cuando impacta contra ella una partícula con una velocidad lo suficientemente elevada (por lo general, de decenas de miles de kilómetros por hora), se forma una nube de iones. Un intenso campo eléctrico separa los portadores de carga y acelera los iones positivos hacia un detector que los cuenta. Dado que los iones más ligeros lo alcanzan antes que los de mayor peso (el tiempo de vuelo es proporcional a la raíz cuadrada de la masa atómica), la señal registrada proporciona un espectro de masas. El instrumento es, estrictamente hablando, un espectrómetro de masas de tiempo de vuelo. El aparato dispone, además, de un detector que puede medir la tasa de impacto y la masa de las partículas en un ambiente de polvo muy denso, con registros de hasta 10.000 impactos por segundo.

En 2009, los análisis del CDA revelaron que las partículas de hielo arrojadas por Encélado se componían principalmente de hielo de agua. Sin embargo, estas contenían a menudo sal común y otras sales de sodio y potasio, en tasas de entre el 0,5 y 2 por ciento. La única interpretación posible de aquel hallazgo era que las sales hubiesen sido disueltas del núcleo rocoso de Encélado. En todos los escenarios «secos» considerados previamente por los investigadores para explicar el origen de los chorros, se habrían producido exclusivamente partículas sin sal. Los datos del CDA refutaron, por tanto, tales hipótesis.



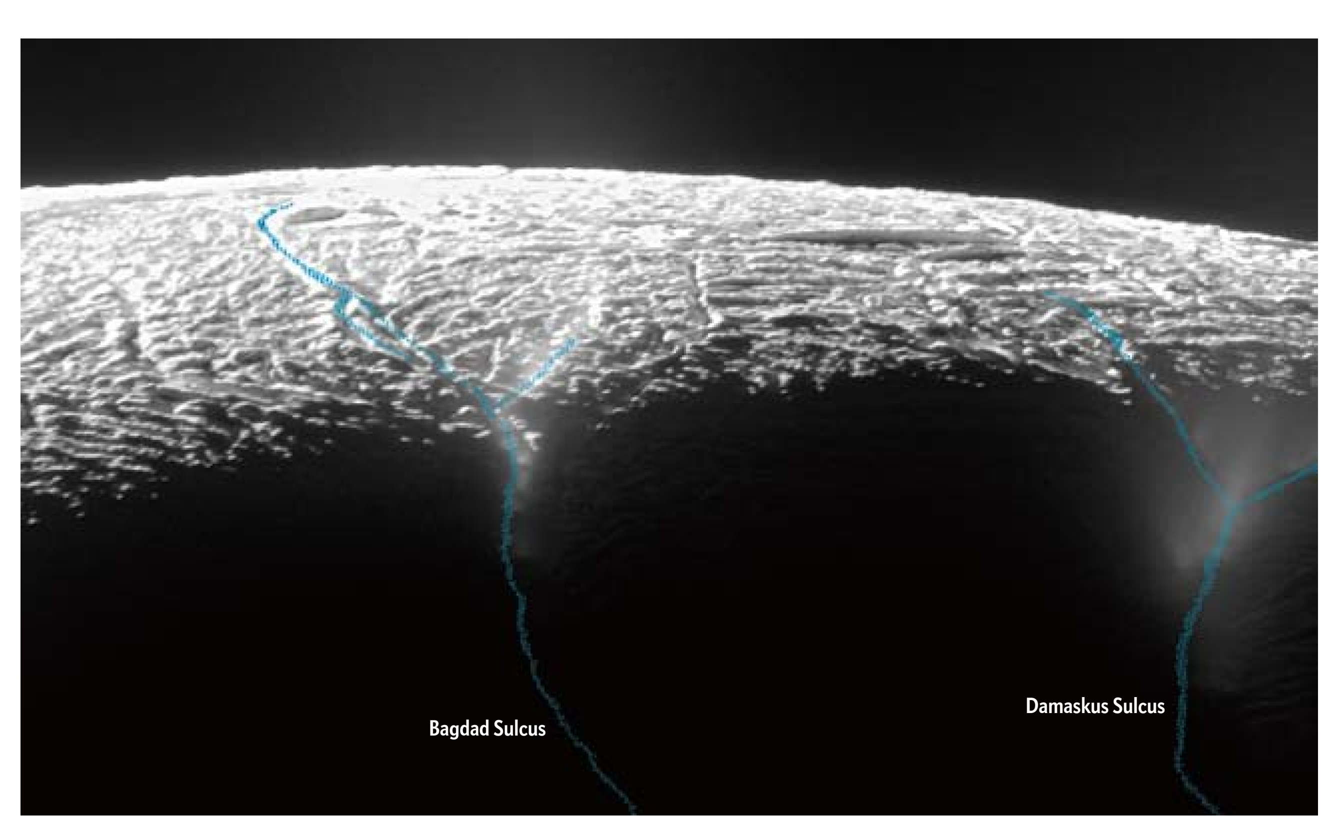
SURCOS EN EL HIELO: Con una resolución de seis metros por píxel, esta fotografía constituye una de las imágenes más nítidas de la superficie de Encélado, aunque no se aprecian las fracturas de menos de diez metros de ancho ni los chorros, solo observables a contraluz. Se cree que las estructuras que se ven como pequeños granos corresponden a bloques de hielo del tamaño aproximado de pequeños edificios. Su mecanismo de formación sigue siendo desconocido.

segundo lugar, las partículas tardaron pocos meses en recorrer los casi 50 kilómetros de distancia que separan el fondo marino de la superficie lunar, lo que da fe de la intensidad de los procesos de circulación que acontecen en el interior de la luna helada.

En conjunto, estos resultados indican que en el interior de Encélado tienen lugar hoy en día fuertes procesos hidrotermales. El *p*H alcalino, de entre 9 y 10,5, recuerda a las condiciones de la Ciudad Perdida. Es posible que, al igual que en las profundidades del Atlántico, en Encélado tengan lugar fenómenos de serpentinización, también observados en los experimentos de Kashiwa. En ellos la roca reacciona con el agua y genera una clase de minerales denominados serpentinas. El proceso libera hidrógeno y, sobre todo, una gran cantidad de calor, lo que podría explicar las elevadas temperaturas.

¿Cómo logran las nanopartículas, el agua y el vapor escapar al espacio? En su camino deben atravesar los casi 10 kilómetros de océano y una gruesa capa de hielo de entre 30 y 40 kilómetros, surcada probablemente por grietas llenas de agua. Como ocurre en los glaciares terrestres, el hielo relativamente cálido de dicha capa presenta deformación plástica. Sin embargo, al llenarse de agua se estabiliza lo suficiente frente a las fuerzas de marea, lo que permitiría el ascenso del agua salada cargada de nanopartículas.

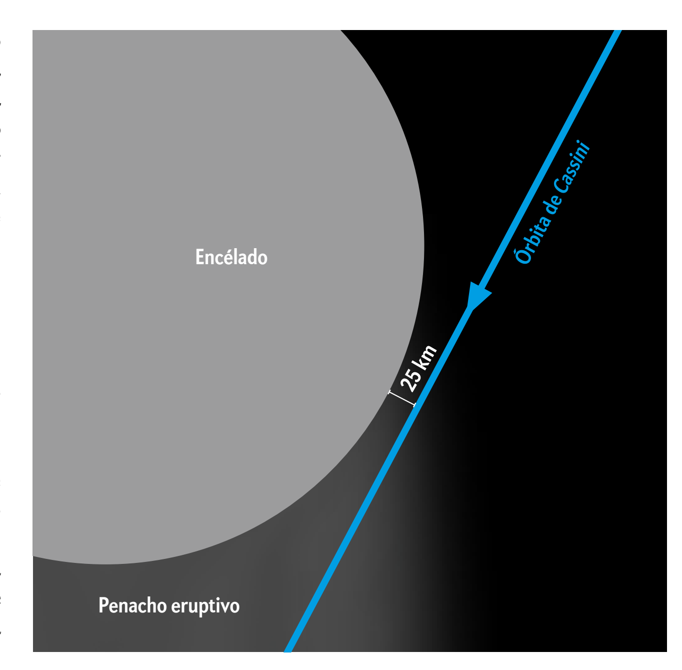
Debido a la diferencia de densidad con el hielo, el agua debería detenerse a algunos kilómetros bajo la superficie. No obstante, probablemente tenga lugar un efecto similar al que ocurre al descorchar una botella de champán: al ascender a través de las grietas, la presión disminuye y se libera dióxido de carbono. Como resultado, las burbujas de gas proporcionan una fuerza



NASA/JPL/SSI (*surcos*); NASA/JPL-CALTECH/SSI; ADAPTACIÓN: *SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT* (*géiseres*)

GÉISERES HELADOS: Los chorros de Encélado emergen de las Rayas de Tigre, un sistema de fosas paralelas que atraviesan el polo sur del satélite a lo largo de cientos de kilómetros. Los dos surcos destacados en azul, Bagdad Sulcus y Damaskus Sulcus, son los más activos.

DE CERCA: **El quinto sobrevuelo de *Cassini* sobre Encélado tuvo lugar el 9 de octubre de 2008. La sonda se aproximó a la luna helada a una velocidad de 17,7 kilómetros por segundo hasta una distancia de 25 kilómetros. Justo antes del momento de máximo acercamiento, se adentró en un penacho eruptivo. El posterior análisis de los datos reveló la existencia de partículas ricas en sales, gracias a lo cual los investigadores pudieron confirmar que en el proceso participaba agua líquida.**



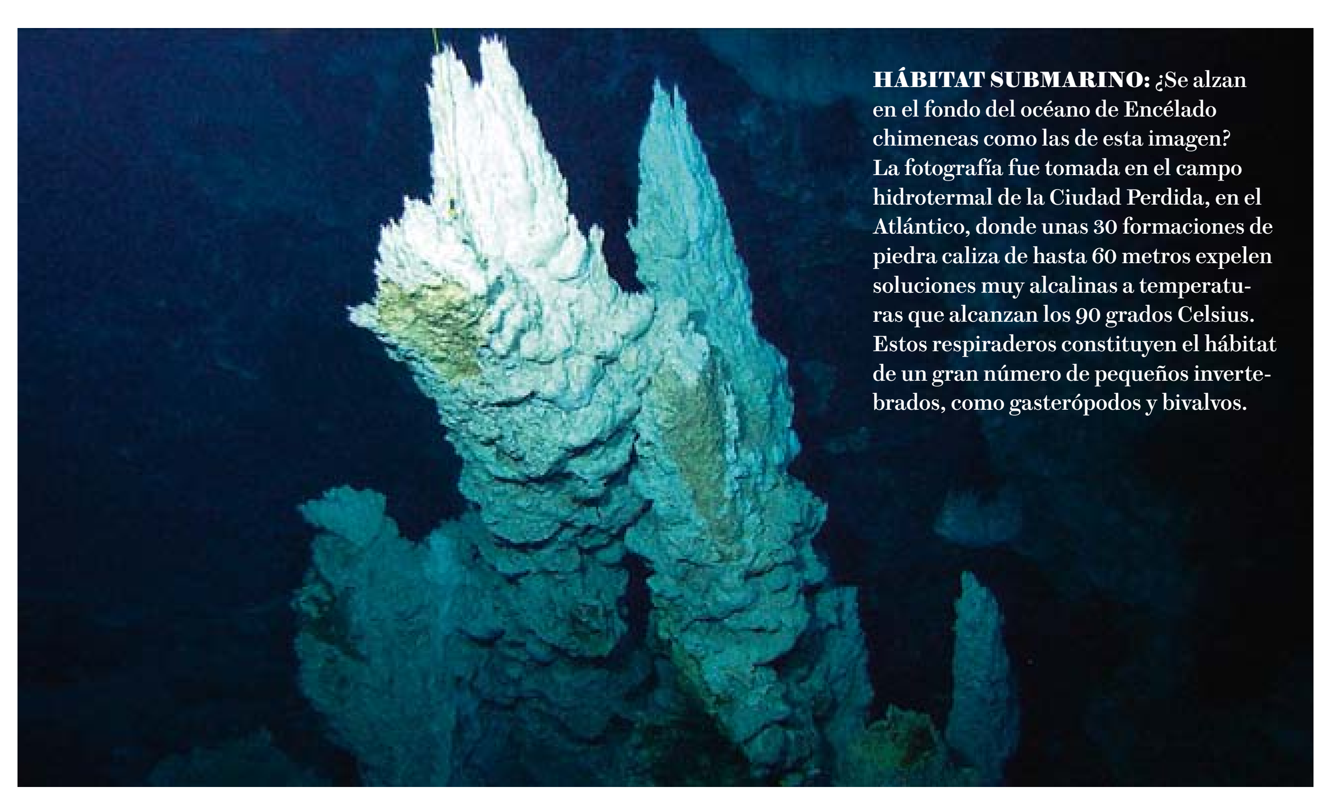
ascensional extra que permite al agua salada quedarse a pocos centenares de metros bajo la superficie del satélite.

Sospechamos que, una vez allí, el agua se acumula en cavidades excavadas en el hielo. Y, al igual que en el champán burbujeante, desde la superficie del océano se liberan diminutas gotas de agua, las cuales forman nubes de niebla. Las gotas se congelan con rapidez y originan gránulos de hielo micrométricos, en cuyo interior quedan atrapadas las nanopartículas. Como consecuencia de las bajas presiones debidas a la escasa distancia al vacío espacial, se evapora una gran cantidad de agua. A través de canales abiertos en el hielo, que en la zona superior ya no se encuentran llenos de líquido, el vapor asciende hasta la superficie y arrastra con él las pequeñas partículas. Finalmente, los chorros las arrojan hacia el exterior.

El gas y el hielo son eyectados al espacio a razón de unos 200 kilogramos por segundo. Las partículas de hielo más rápidas adquieren energía suficiente para alcanzar el anillo E, donde quedan expuestas al corrosivo plasma que rodea al planeta. Poco a poco, el bombardeo de las partículas de alta energía libera las nanopartículas de SiO_2 de su matriz helada. Al cabo de unas horas o días, adquieren carga eléctrica por acción del plasma y quedan a merced de las fuerzas electromagnéticas; la magnetosfera de Saturno les confiere la velocidad de escape necesaria para abandonar el entorno del planeta y mezclarse con el viento solar. Con velocidades de hasta un millón de kilómetros por hora (el uno por ciento de la velocidad de la luz), desaparecen en la vastedad del espacio.

FUENTES DE CALOR

Además del CDA, *Cassini* está dotada de otros instrumentos que observan con regularidad la región sur del satélite, geológicamente activa. Estos incluyen el Espectrómetro de Infrarrojos Compuesto, el Espectrómetro para el Cartografiado en el Visible y el Infrarrojo (VIMS) y la cámara de a bordo, el Subsistema de Imágenes. En verano de 2014, un equipo estadounidense

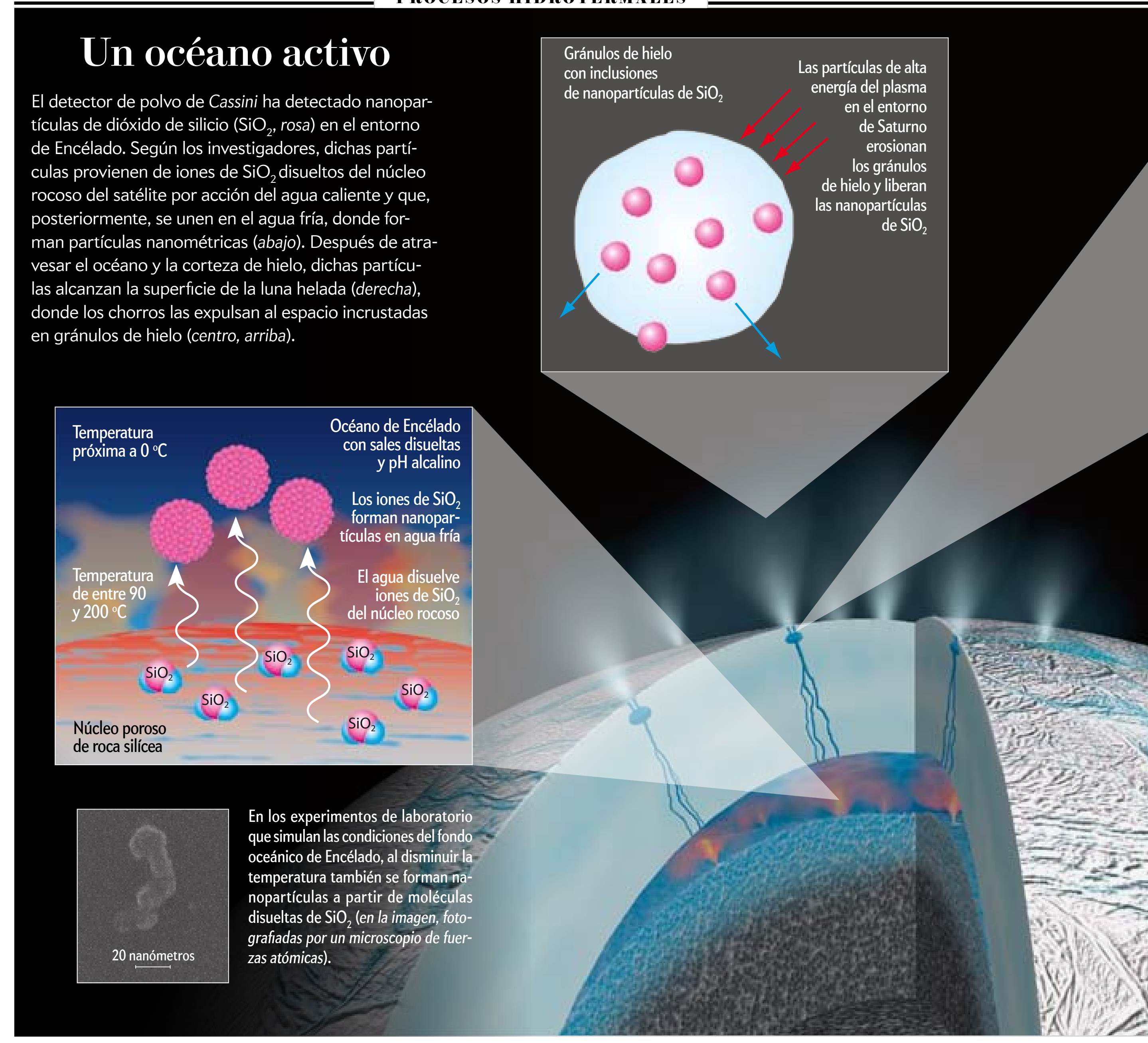


HÁBITAT SUBMARINO: **¿Se alzan en el fondo del océano de Encélado chimeneas como las de esta imagen? La fotografía fue tomada en el campo hidrotermal de la Ciudad Perdida, en el Atlántico, donde unas 30 formaciones de piedra caliza de hasta 60 metros expelen soluciones muy alcalinas a temperaturas que alcanzan los 90 grados Celsius. Estos respiraderos constituyen el hábitat de un gran número de pequeños invertebrados, como gasterópodos y bivalvos.**

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT (órbita de Cassini); IFE, URI-IAO, UW, LOST CITY SCIENCE PARTY; NOAA/OAR/OER; LOST CITY 2005 EXPEDITION (chimenea)

Un océano activo

El detector de polvo de *Cassini* ha detectado nanopartículas de dióxido de silicio (SiO_2, *rosa*) en el entorno de Encélado. Según los investigadores, dichas partículas provienen de iones de SiO_2 disueltos del núcleo rocoso del satélite por acción del agua caliente y que, posteriormente, se unen en el agua fría, donde forman partículas nanométricas (*abajo*). Después de atravesar el océano y la corteza de hielo, dichas partículas alcanzan la superficie de la luna helada (*derecha*), donde los chorros las expulsan al espacio incrustadas en gránulos de hielo (*centro, arriba*).



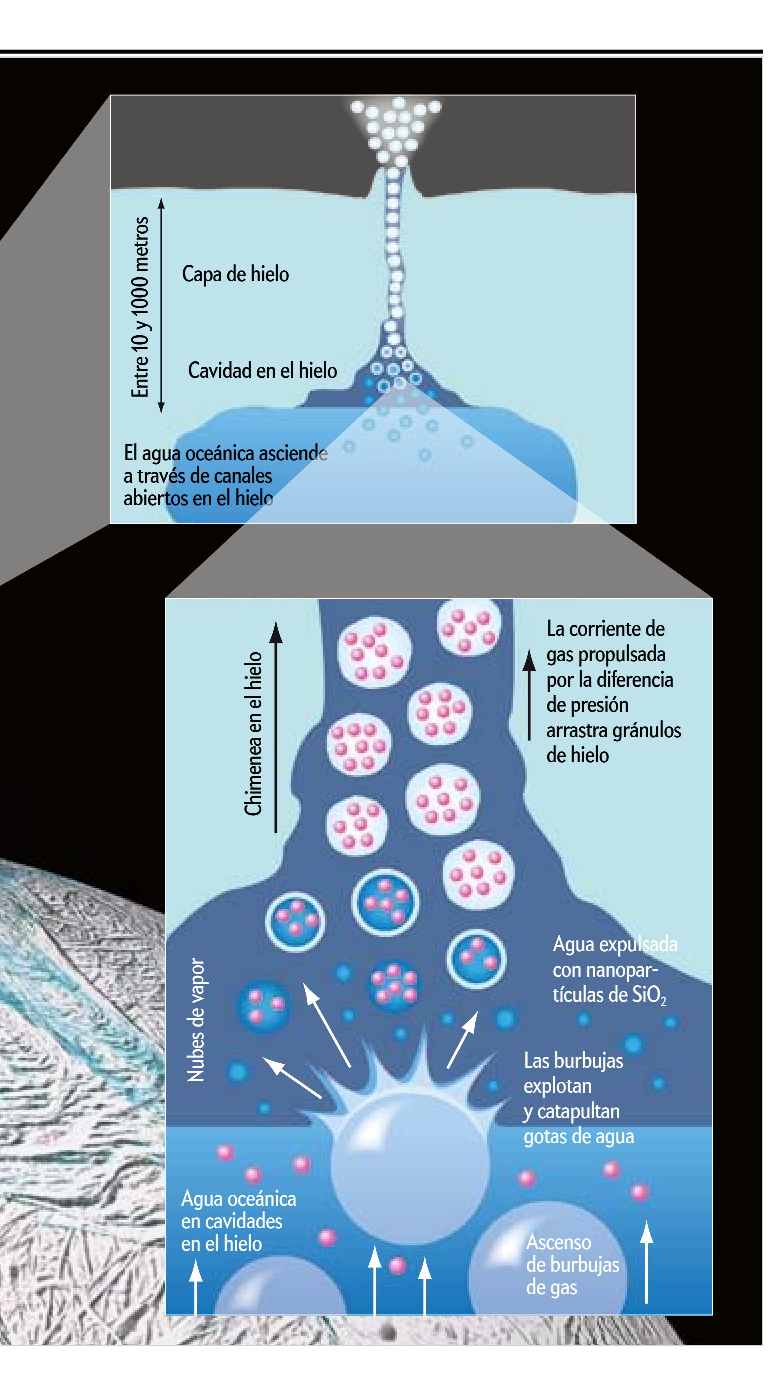
En los experimentos de laboratorio que simulan las condiciones del fondo oceánico de Encélado, al disminuir la temperatura también se forman nanopartículas a partir de moléculas disueltas de SiO_2 (*en la imagen, fotografiadas por un microscopio de fuerzas atómicas*).

publicó un compendio basado en los datos tomados por estos instrumentos. A partir de las imágenes y mediciones geodésicas, los investigadores determinaron la posición de un gran número de chorros y comprobaron que, en un buen número de ellos, las temperaturas se elevaban más de 100 grados por encima de los valores ambientales, de en torno a 200 grados Celsius bajo cero. De acuerdo con los datos del VIMS, las bocas eruptivas presentan diámetros menores de diez metros, pudiendo alcanzar tamaños muy reducidos. Ello implicaría que las elevadas temperaturas se deben al calor latente liberado cuando el vapor se congela junto a las frías paredes de hielo.

A pesar de todo, aún no sabemos a ciencia cierta de dónde procede la energía térmica en un océano tan alejado del Sol. La posibilidad más obvia lleva a pensar en un calentamiento provocado por las fuerzas de marea, el mismo fenómeno que causa la actividad volcánica en Ío, el satélite joviano, y que también se cree responsable de la existencia del océano en Europa. Los efectos de este mecanismo se observan a medida que, en el curso de una trayectoria elíptica, la distancia entre un satélite y su planeta cambia. La gravedad del segundo induce deformaciones variables en el primero, lo que provoca procesos de rozamiento entre el manto y la corteza que desprenden calor.

En 2013, los datos del VIMS hicieron sospechar que, en efecto, las mareas de Saturno desempeñaban un papel fundamental en el proceso. Esta hipótesis se vio confirmada en 2014 por la cámara de a bordo. Las observaciones mostraron que el brillo de los penachos eruptivos de Encélado presentaba fluctuaciones periódicas, lo que implicaba que también variaba la cantidad de material expulsado. Al parecer, las principales grietas y las chimeneas de agua y vapor del resquebrajado

YASUHITO SEKINE Y FRANK POSTBERG (*nanopartícula de SiO_2*)



NASA/JPL/CALTECH (*Encélado*); *SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*/BUSKE-GRAFIK, SEGÚN FRANK POSTBERG (*gráficos*)

manto helado se abren más o menos en función del tirón que ejercen las fuerzas de marea. Un modelo sencillo permite reproducir los cambios periódicos de brillo, aunque, de momento, la sucesión temporal de acontecimientos no se deja predecir de forma correcta.

Estudios recientes han argumentado que, para explicar la emisión térmica de Encélado, se necesitarían al menos 5000 megavatios de potencia: cinco veces más de lo que se estima que puede causar el calentamiento por fuerzas de marea. A la vista de que el suministro de energía que recibe el satélite resulta demasiado bajo para mantener de forma permanente su actividad, se ha planteado la posibilidad de que esta sea transitoria, hipótesis que parecen respaldar los modelos. Tal vez la luna helada alterne períodos de calma y actividad de millones de años de duración.

Por otro lado, cabe también preguntarse por el calor liberado por los procesos de serpentinización. Estos podrían revestir importancia si el núcleo de Encélado fuese poroso, en cuyo caso el agua podría penetrar en él y dar lugar a un gran depósito para dichas reacciones. Eso es justamente lo que sugieren las mediciones gravimétricas, las cuales indican que la densidad del núcleo se situaría entre 2,2 y 2,5 gramos por centímetro cúbico, un valor inferior al que cabría esperar si estuviese formado por roca compacta. La hipótesis se antoja muy plausible: la gravedad superficial de Encélado apenas llega al 1,2 por ciento de la terrestre, por lo que el material que rodea al núcleo no podría comprimirlo en exceso.

A finales del pasado mes de octubre, *Cassini* sobrevoló Encélado por vigesimoprimera vez y se adentró en las nubes eruptivas que emanan de su superficie. Uno de los objetivos de este último acercamiento fue, precisamente, medir la abundancia de hidrógeno molecular, un producto abundante de las reacciones de serpentinización. Pronto los investigadores podrán comenzar a analizar estos y otros datos.

¿UN ENTORNO APTO PARA LA VIDA?

Es probable que la pregunta sobre la misteriosa fuente de energía de Encélado quede sin respuesta durante largo tiempo. Mientras tanto, las misiones futuras intentarán comprobar si el satélite reúne las condiciones necesarias para alojar vida. Los detectores de polvo modernos poseen espectrómetros de masas cuyas capacidades superan con creces las del CDA, diseñado hace dos décadas. Con nuevos dispositivos podrían buscarse aminoácidos y determinar su frecuencia relativa de aparición. Un número creciente de investigadores aceptan que, en la Tierra, los primeros seres vivos probablemente apareciesen en fuentes hidrotermales alcalinas. Tal vez pronto podamos comprobar si, al igual que ocurre en la Ciudad Perdida, las aguas de Encélado bullen con vida.

En cualquier caso, el pequeño satélite de Saturno nos obliga a una reflexión fundamental. La búsqueda de formas de vida extraterrestre se ha centrado hasta ahora en exoplanetas similares a la Tierra. Sin embargo, tales condiciones tal vez no supongan más que la punta del iceberg. Si en lugares como Encélado se dan los requisitos necesarios para la vida, tal vez hayamos estado subestimando enormemente la habitabilidad del universo.

PARA SABER MÁS

Sodium salts in E-ring ice grains from an ocean below the surface of Enceladus. F. Postberg et al. en *Nature*, vol. 459, págs. 1098-1101, 2009.
Enceladus: An active ice world in the Saturn system. J. R. Spencer y F. Nimmo en *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, vol. 41, págs. 693-717, 2013.
The gravity field and interior structure of Enceladus. L. Iess et al. en *Science*, vol. 344, págs. 78-80, 2014.
Energy at life's origin. W. F. Martin et al. en *Science*, vol. 344, págs. 1092-1093, 2014.
Ongoing hydrothermal activities within Enceladus. H.-W. Hsu, F. Postberg, Y. Sekine et al. en *Nature*, vol. 519, págs. 207-210, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Cassini-Huygens en Saturno. Jonathan I. Lunine en *IyC*, septiembre de 2004.
Encélado. Carolyn Porco en *IyC*, marzo de 2009.

ARQUEOASTRONOMÍA

LAS ESTRELLAS DE LOS DIFUNTOS

En ataúdes egipcios de 4000 años de antigüedad se han descubierto unas misteriosas tablas astronómicas. ¿Cuál era su finalidad?

Sarah Symons y Elizabeth Tasker

La ciudad egipcia de Mallawi, situada a más de 400 kilómetros al norte del complejo de Lúxor, no se halla entre los principales destinos turísticos del país. En mayo de 2013, una de nosotras (Symons) viajó hasta allí junto con Robert Cockcroft, investigador posdoctoral de su laboratorio, con la esperanza de ver uno de los registros astronómicos más antiguos del mundo. La tabla en cuestión, descrita hasta entonces solo de manera vaga, se encontraba en efecto allí. Pero ambos quedaron atónitos al descubrir que no era la única.

En la sala principal del Museo de Monumentos de Mallawi, Cockcroft vio algo escrito cuando estaba agachado junto a una vitrina que contenía un ataúd, estirando el cuello para ver la parte inferior de la cubierta. Symons orientó su linterna hacia un listón delgado en forma de cruz que sujetaba las planchas de madera. La superficie estaba decorada con elegantes jeroglíficos que representaban nombres de estrellas. Hasta entonces, nadie había apreciado la importancia de aquel listón: había sido colocado junto a ese sarcófago concreto por error.

Los registros astronómicos de este tipo comenzaron a descubrirse en la década de 1890, durante la inspección de las tumbas de Asiut, un complejo de enterramientos vecino. Al abrir algunos ataúdes que contenían los restos momificados de nobles locales, los exploradores hallaron diseños muy específicos en la parte interior de las tapas. Lo normal hubiera sido encontrar superficies de madera sin decorar o fragmentos de los textos religiosos habituales. Sin embargo, aquellos dibujos constituían una tabla bien organizada de nombres de estrellas y registraban los movimientos de algunas, como Sirio, a lo largo del año.

Symons, historiadora de la ciencia, ha pasado los últimos veinte años catalogando y analizando esas tablas. Si nos atenemos a cierto criterio para contarlas, se conocen 27 registros de esta índole. De ellos, solo uno no procede de un sarcófago: adorna el techo de un templo. La mayor parte de las tablas datan de hacia 2100 antes de nuestra era. A partir de su estudio y del de otros jeroglíficos, y con la ayuda de programas informáticos de astronomía, Symons espera averiguar cómo y por qué los antiguos egipcios elaboraron estas tablas y qué métodos de observación utilizaron para compilarlas. Sus trabajos ponen en duda la explicación admitida hasta ahora sobre las razones que llevaron a los egipcios del Imperio Medio a elaborar aquellas listas de astros. En último término, la respuesta podría ayudar a esclarecer el alcance de los conocimientos astronómicos en el antiguo Egipto.

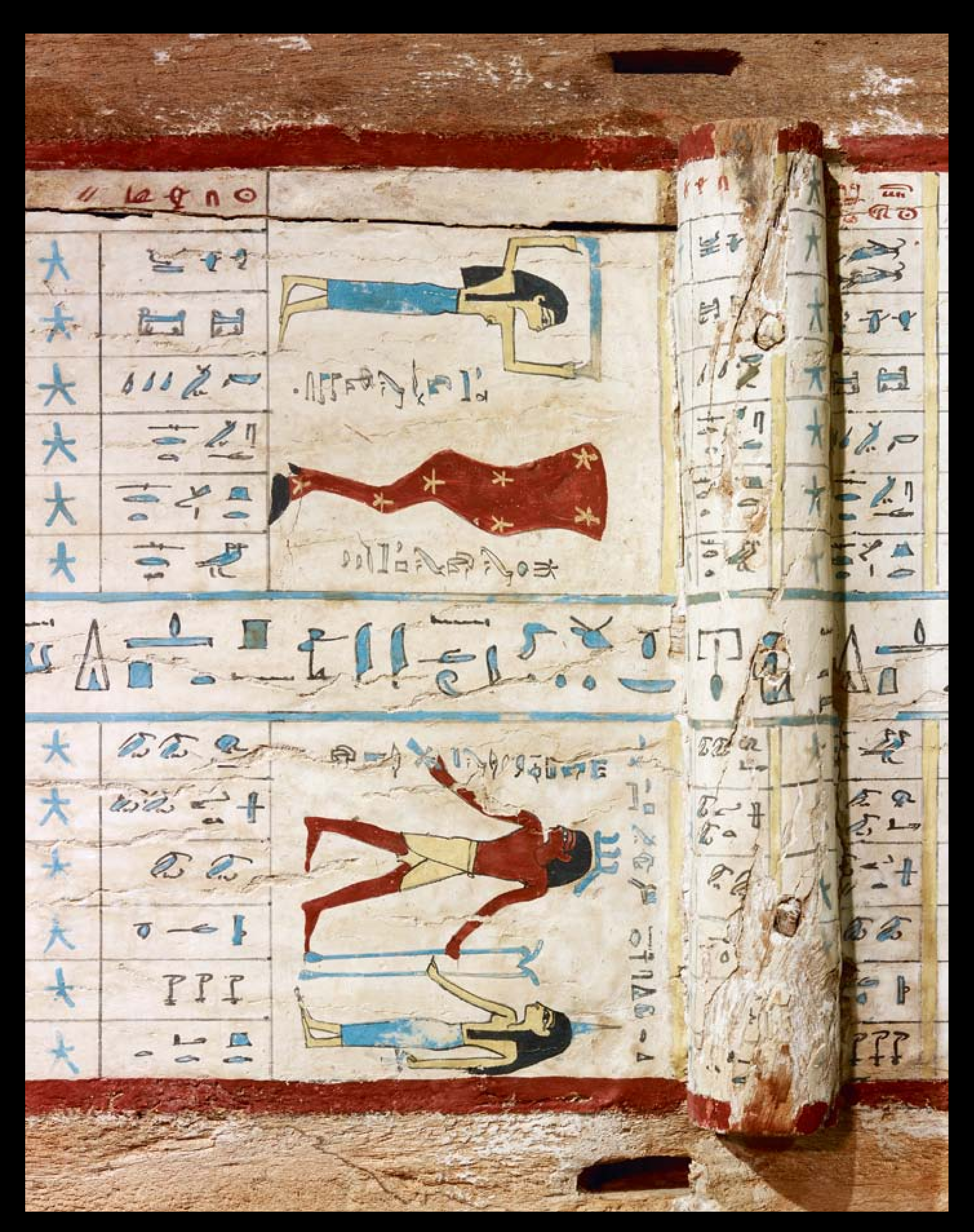
EN SÍNTESIS

En el interior de algunos ataúdes del antiguo Egipto se han hallado tablas astronómicas que parecen indicar la salida o el ocaso de varias estrellas a lo largo del año.

Hasta ahora se creía que dichas tablas funcionaban a modo de «reloj» nocturno. Habrían servido para determinar el momento adecuado de ciertos rituales que se celebraban durante la noche.

Una investigación reciente sugiere otra posibilidad: los registros astronómicos pudieron haberse confeccionado para ayudar a los difuntos a alcanzar su lugar en el cielo.

FERIT KUYAS



DETALLE DE UNA TABLA ASTRONÓMICA de 4000 años de antigüedad descubierta en la tapa de un ataúd egipcio. Muestra los dioses de los cielos (*figuras de gran tamaño*) y varias ofrendas (*franja horizontal*). Las columnas a ambos lados listan distintas estrellas observadas por los astrónomos en cierta semana del año.

¿RELOJES ESTELARES?

Los excavadores que descubrieron los primeros registros ya sabían que representaban estrellas. Sin embargo, hasta los años sesenta del siglo xx nadie propuso una hipótesis general sobre su función y significado. En los tres volúmenes de sus *Egyptian astronomical texts*, el historiador de la ciencia Otto Neugebauer y el egiptólogo Richard A. Parker describieron las trece tablas descubiertas hasta el momento y sugirieron que representaban el orden en que ciertas estrellas (o pequeños grupos de ellas) asomaban por el horizonte en las noches de cada semana del año. Argumentaron que esa información se habría plasmado con el objetivo de determinar la hora durante la noche: un observador que reconociese qué estrella se encontraba en el horizonte en un momento dado tendría una idea del tiempo que había transcurrido desde el ocaso. En consecuencia, Neugebauer y Parker se refirieron a los registros como «relojes estelares».

Si dichos relojes hubiesen estado accesibles en un lugar que no fuera la cara oculta de la tapa de un ataúd, habrían sido de utilidad para los sacerdotes de la época. Según la mitología egipcia, el sol recorría un peligroso camino durante la noche, en el que debía superar múltiples obstáculos. Mediante la práctica de ciertos rituales en horas clave, los sacerdotes habrían podido seguir el curso del sol y asistirle en su trayecto.

La descripción de las tablas proporcionada por Neugebauer y Parker resultaba compatible con dicha explicación. Una tabla se divide en cuatro partes por una franja horizontal y otra vertical. La horizontal contiene una línea de un texto religioso sobre la ofrenda a algunas divinidades, mientras que la vertical incluye cuatro imágenes de los dioses mismos. Lo que llevó a Neugebauer y Parker a formular la idea de un reloj fue que, a lo largo de su borde superior, podía reconocerse el antiguo calendario civil egipcio (*véase el recuadro* «Navegar entre las estrellas»).

Cada mes del calendario egipcio contaba con tres semanas de diez días. De esta manera, doce meses seguidos de cinco días daban un total de 365 días al año. Una tabla de estrellas completa, leída de derecha a izquierda, incluye 40 columnas. Las primeras 36 corresponden a las semanas; las tres siguientes contienen una lista completa de las estrellas incluidas (representadas normalmente por los números del 1 al 36), y la última representa la media semana restante del año civil. Dado que la columna correspondiente a cada semana de diez días estaba encabezada por una estrella diferente, estas reciben hoy el nombre de «decanos» (del griego *deca*, «diez»).

Cada columna de decanos consta de doce filas. Según razonaron Neugebauer y Parker, esa disposición representa el orden en que cada astro asoma por el horizonte en el cielo nocturno, por lo que cada fila correspondería a una «hora» de la noche. La celdilla superior contiene el nombre del decano que asoma por oriente justo después de la puesta de sol. A este le siguen otros once, los cuales van apareciendo en el cielo en el mismo orden que en la columna. Diez días más tarde, sin embargo, empieza la siguiente semana civil, por lo que el firmamento habrá cambiado: el primer decano en salir tras ponerse el sol será otro y, por tanto, su nombre deberá ocupar la celdilla superior de la columna correspondiente. Como resultado, la tabla reproduce una estructura diagonal en la que cada decano migra desde la zona inferior derecha hasta la superior izquierda (ya que, a medida que transcurre el año, aparecerá antes en el horizonte).

Si el año tuviese 360 días, la tabla consistiría en un ciclo ininterrumpido de 36 decanos. Tras la salida del decano número 36 en el cielo nocturno, el primero de ellos volvería a aparecer tras él la semana siguiente. Sin embargo, la media semana añadida al final del año altera dicha progresión. Según Neugebauer y Parker, los antiguos egipcios resolvieron este problema registrando los movimientos de una serie totalmente nueva de decanos. Dado que estos también ascendían en diagonal, formaban un triángulo en el lado izquierdo de la tabla.

En las representaciones esquemáticas de las tablas, los investigadores etiquetan los decanos de dicho triángulo con letras, en lugar de números. Pero en los dibujos de los sarcófagos no hay ningún indicio que haga pensar que los egipcios atribuían a los decanos del triángulo una importancia mayor o menor que a los 36 restantes. Sin embargo, otras representaciones astronómicas halladas en los techos de templos y tumbas (con un diseño que, probablemente, es coetáneo de las tablas de los sarcófagos) sí hacen esta distinción. Ello ha provocado debates sobre qué surgió antes: la idea de 36 decanos «perfectos» que avanzan de manera regular en el cielo, o las observaciones de distintas estrellas reales que se desplazan anualmente de manera más compleja.

Sarah Symons es profesora en la Universidad McMaster y directora del Planetario William J. McCallion, ambos en Ontario. Experta en la astronomía del antiguo Egipto, sus intereses se centran en la historia y la enseñanza de la ciencia.

Elizabeth Tasker enseña en la Universidad Hokkaido de Japón. Trabaja en comunicación científica e investiga la formación de galaxias, estrellas y planetas mediante simulaciones por ordenador.



LA TABLA DE ESTRELLAS reproducida en la página anterior se encuentra en el Museo de la Universidad de Tubinga, donde se expone sobre el ataúd al que adornaba.

Cualquiera que sea la solución, la presencia del triángulo confirma que las tablas aparecieron como resultado de auténticas observaciones astronómicas. El nivel de complejidad añadido por los decanos complementarios permite argumentar contra la consideración de las tablas como un simple modelo idealizado del cosmos.

COMPLICACIONES

Pese a la elegancia de la explicación de Neugebauer y Parker, su interpretación de las tablas deja varias preguntas importantes sin respuesta. Un problema que estos investigadores ya reconocieron en los años sesenta deriva del hecho de que no todas las tablas a las que tenían acceso entonces eran iguales.

Para un observador inexperto, el formato de todas ellas parece idéntico, con una disposición de columnas ordenadas en las que, en muchos casos, se muestran los mismos nombres de los decanos. No obstante, una inspección más cuidadosa revela que las tablas pueden clasificarse en dos grandes grupos, en los que los decanos se desplazan varias columnas. Neugebauer y Parker sugirieron que esa variación se debía a que el calendario civil egipcio no incluía años bisiestos. Si los autores de las tablas, que ignoraban la existencia de un cuarto de día suplementario al año, elaboraban dos de ellas con 40 años de diferencia, el desfase de 40 cuartos de día implicaría que la segunda tabla tendría las posiciones de las estrellas desplazadas una semana de diez días. Neugebauer y Parker dieron por sentado que, si se descubrían más tablas o documentos análogos, aparecerían ejemplos de esquemas intermedios entre los dos grupos conocidos.

Sin embargo, el trabajo de Symons pone en duda dicha tesis. La investigadora ha estudiado directamente o examinado fotografías de todas las tablas conocidas, incluidas las que se descubrieron después de la década de los sesenta. Todas ellas pueden clasificarse en uno de los dos grupos que hoy en día aceptan los egiptólogos, sin que haya aparecido ninguna que contenga un esquema alternativo. Por otra parte, la separación entre decanos emparejados varía; una progresión basada en un ciclo de años bisiestos desplazaría en bloque todos los decanos y conservaría sus espacios relativos.

Además, Neugebauer y Parker no podían estar seguros de que las tablas reflejasen la salida de las estrellas por el horizonte. Los análisis de Symons han dado lugar a otras explicaciones que se antojan igual de plausibles. Estas derivan de la existencia de ciertas incoherencias entre los dos tipos de tablas, las cuales van más allá de un desplazamiento de los decanos en las columnas. Por ejemplo, el orden de aparición de algunos de ellos varía. Y Symons tiene a su disposición herramientas con las que no contaban Neugebauer y Parker.

Hoy existen potentes programas informáticos que permiten retroceder milenios y averiguar el aspecto que presentaba el cielo nocturno en el antiguo Egipto. En la actualidad, el eje de rotación de la Tierra apunta aproximadamente a la estrella Polar. Sin embargo, dicho eje oscila con lentitud, recorriendo un círculo cada 25.800 años aproximadamente. Por tanto, por más que las posiciones relativas de las estrellas no se hayan modificado, los cuerpos celestes ocupan hoy una posición distinta que hace 4000 años.

Conocer con precisión el aspecto que presentaba el cielo en la antigüedad ayuda a ofrecer explicaciones que resultan difíciles de visualizar de otro modo. Los programas informáticos dejan claro que las incoherencias entre los dos grupos de tablas pueden explicarse si las estrellas se observaban utilizando dos métodos distintos. Debido a la inclinación de la Tierra con respecto a la esfera celeste, todas las estrellas que salen al mismo tiempo por el horizonte oriental (vistas desde cualquier lugar de Egipto) se ponen en momentos distintos. Ello justificaría la distorsión, o incluso el cambio en el orden de los decanos, si la tabla estuviera basada en el ocaso de las estrellas, no en su salida. Los desplazamientos que se aprecian en los dos tipos de tablas pueden explicarse si consideramos que una clase representa la salida de los astros y la otra, el ocaso.

Los programas informáticos permiten asimismo poner a prueba otras posibilidades y, en su caso, descartarlas. Por ejemplo, cabría pensar que las diferencias entre los dos tipos de tablas se deben a que las estrellas fueron observadas desde dos lugares de Egipto. Pero una comparación con las simulaciones por ordenador sugiere con fuerza que esto no fue lo que ocurrió. Las observaciones tendrían que haberse efectuado en los extremos norte y sur del país para que la diferencia de latitud justificase los cambios observados en las tablas.

No obstante, las simulaciones no nos permiten averiguarlo todo. La hipótesis de que las tablas reflejaban los lugares de salida y ocaso de las estrellas parece funcionar, pero también son posibles otras explicaciones. Por ejemplo, el «horizonte» empleado en las observaciones pudo haber sido un muro o un punto situado sobre un árbol determinado. Con toda su potencia de cálculo, los ordenadores no pueden más que atenerse a los datos disponibles, por lo que resultan más adecuados para excluir posibilidades que para «demostrar» lo que en realidad sucedió.

Las mismas limitaciones aparecen cuando intentamos emplear los programas para averiguar qué estrellas de nuestro cielo corresponden a los antiguos decanos. Hasta el momento, las simulaciones por ordenador han confirmado que uno de ellos era Sirio (transliterado de los jeroglíficos como *Spdt*, y que se pronuncia y escribe como *Sopdet*), la estrella más brillante del cielo tanto entonces como ahora y un objeto celeste importante en la astronomía egipcia. Algunos investigadores han sugerido identificaciones plausibles de otras estrellas, pero el nivel de confianza varía de un decano a otro.

La mayoría de los expertos están de acuerdo en que *Khau* denota las Pléyades, algo que confirman las simulaciones por ordenador. *Tjemes en Khentet* es, probablemente, una estrella roja, ya que *tjemes* significa «rojo». Este dato, unido a la ubicación del decano con respecto a Sirio en las simulaciones, apunta a Antares. No obstante, más allá de estas deducciones bastante obvias, cualquier historiador del antiguo Egipto podría argumentar en favor de tal o cual estrella, pues los criterios para pensar que los egipcios seleccionaron un determinado astro como decano varían. ¿A qué punto del cielo deberíamos dirigir nuestra mirada para observar la salida de una estrella? ¿Al este exacto, o una posición desplazada cinco o diez grados con respecto al este? ¿Elegiríamos una estrella brillante y bien conocida, aunque no se encontrase en la posición correcta, u otra menos visible pero que saliese exactamente por el lugar señalado para confeccionar las tablas?

Si supiéramos con precisión qué estrellas se emplearon, podríamos deducir los métodos de observación. Y al revés: si conociéramos los métodos, podríamos deducir de qué estrellas se trataba. Dado que ignoramos ambas cosas, quedamos en una posición en la que solo podemos formular hipótesis.

Sin embargo, más que centrarnos en las alternativas sugeridas por la existencia de los dos tipos de tablas, tal vez debamos reconsiderar su propósito. Neugebauer y Parker dedujeron que desempeñaban el papel de relojes. El término implica un sistema de medición del tiempo análogo al que usamos en la actualidad:

Navegar entre las estrellas

Hace más de 4000 años, los egipcios elaboraron complejas tablas que indicaban el orden en que ciertas estrellas aparecían o desaparecían por el horizonte. Algunos investigadores creen que fueron utilizadas para medir el tiempo después de la puesta de sol. Sin embargo, las investigaciones de una de las autoras de este artículo (Symons) hacen pensar que las tablas —la mayor parte de las cuales han sido halladas en el interior de ataúdes— se confeccionaron para guiar a los difuntos en su camino al cielo. Este esquema simplificado indica cómo funcionaría una tabla basada en la salida de las estrellas.

LOS JEROGLÍFICOS ORIGINALES han sido reemplazados por números y letras.

LAS TRES ESTACIONES del año egipcio, Akhet, Peret y Shemu, se dividen en cuatro meses de tres semanas cada uno (cada semana tenía 10 días).

DÍAS SUPLEMENTARIOS: A la tabla de 360 días hay que añadirle 5 días para completar el año. Las estrellas correspondientes a esos días se muestran en la columna final. Esta columna y las tres precedentes listan los nombres de todos los decanos.

Lista de decanos				IV Shemu			III Shemu			II Shemu			I Shemu			IV Peret			III Peret		
A	25	13	1	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19
B	26	14	2	A	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20
C	27	15	3	B	A	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21
D	28	16	4	C	B	A	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22
E	29	17	5	D	C	B	A	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24	23
F	30	18	6	E	D	C	B	A	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25	24
Texto religioso sobre ofrendas a los dioses																					
G	31	19	7	F	E	D	C	B	A	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26	25
H	32	20	8	G	F	E	D	C	B	A	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27	26
I	33	21	9	H	G	F	E	D	C	B	A	36	35	34	33	32	31	30	29	28	27
J	34	22	10	I	H	G	F	E	D	C	B	A	36	35	34	33	32	31	30	29	28
K	35	23	11	J	I	H	G	F	E	D	C	B	A	36	35	34	33	32	31	30	29
L	36	24	12	K	J	I	H	G	F	E	D	C	B	A	36	35	34	33	32	31	30

DECANOS DEL TRIÁNGULO, así llamados por su disposición en la tabla.

DECANOS NORMALES

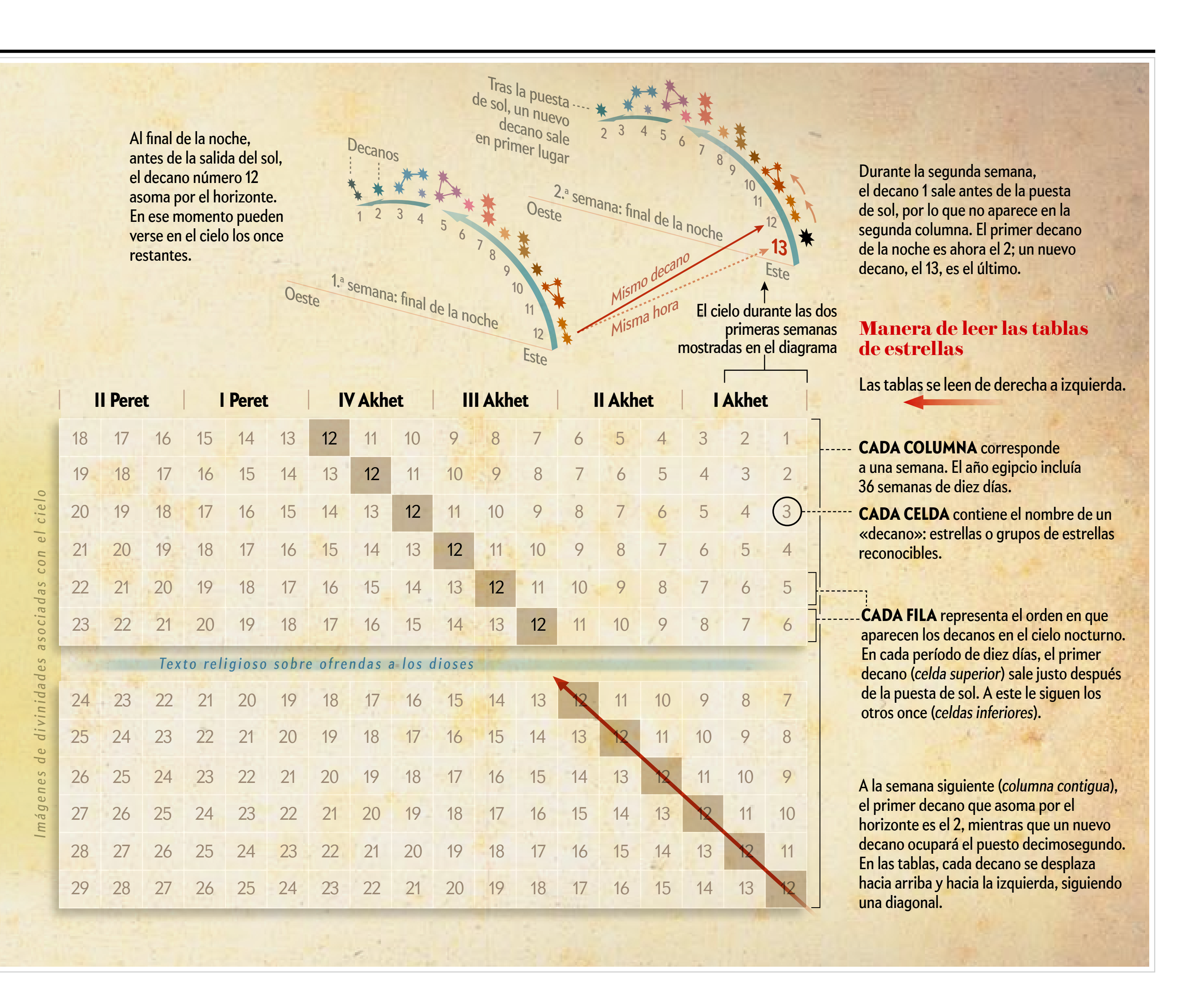
las tablas habrían servido como un instrumento cuya finalidad principal era informar de manera precisa sobre la hora. Pero este punto de vista no se corresponde con la manera en que los antiguos egipcios solían tratar el paso del tiempo. Por más que hoy lo consideremos un transcurso abstracto de horas, minutos y segundos, en Egipto la hora del día o de la noche quedaba determinada en función del movimiento del sol y de las estrellas. La medianoche o la aurora, por ejemplo, eran aquellos momentos en los que determinadas estrellas resultaban visibles o en que el sol ocupaba cierta región del cielo, no tanto un instante bien definido de manera independiente.

Ese aspecto de la cultura egipcia se opone a la idea de que la finalidad de las tablas fuese mantener un control preciso del tiempo, por lo que el término «tablas de estrellas» parece más adecuado que el de «relojes estelares». Por otro lado, las simulaciones por ordenador indican que en el cielo del antiguo Egipto no siempre había una estrella brillante en el lugar y momento precisos. Además, las estrellas no pueden verse hasta que el cielo no está lo suficientemente oscuro, por lo que, en conjunto, las «horas» determinadas por un reloj estelar tendrían menos de 60 minutos y, probablemente, resultarían bastante irregulares. Por todo ello, Symons cree que las tablas habrían servido más bien como almanaques o mapas de estrellas, concebidos para registrar el estado del cielo a lo largo del tiempo, y no tanto como relojes de uso práctico.

La pregunta obvia es, desde luego, por qué las tablas de estrellas se han encontrado sobre todo en el interior de ataúdes. ¿Por qué tenían los muertos que saber la hora? ¿Necesitaban conocer el movimiento del cielo?

La respuesta más probable guarda relación con las creencias de los egipcios sobre la vida después de la muerte. Los templos, las tumbas e incluso los ataúdes eran modelos del universo en los que el techo o el interior de la tapa representaban el cielo. Algunos de los escritos religiosos más antiguos que existen, los textos de las pirámides, indican que las almas podían renacer en forma de estrellas. Se pensaba que, al morir, los faraones pasaban a formar parte de las estrellas circumpolares, cuya proximidad al polo norte celeste implica que nunca salen ni se ponen, como si se tratase de astros «inmortales». Más tarde, la idea tal vez se extendiese a otros individuos notables (como los grandes señores de la zona de Asiut), los cuales se convertirían en estrellas más bajas, cuyos recorridos sí cruzaban el horizonte

5W INFOGRAPHICS (*esquema*); FERIT KUYAS (*jeroglífico*)



II Peret			I Peret			IV Akhet			III Akhet			II Akhet			I Akhet		
18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2
20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3
21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4
22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5
23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6
24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7
25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8
26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9
27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10
28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11
29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12

en diferentes épocas del año. En tal caso, los difuntos podrían necesitar la tabla de estrellas como guía en su camino para unirse con los decanos.

DIGITALIZAR EL PASADO

Para facilitar la investigación futura, Symons ha elaborado un banco de datos en línea con la información hallada en todas las tablas conocidas. Esta recopilación proporciona a los investigadores una fuente común y evita la necesidad de manipular los frágiles ataúdes, con el consiguiente riesgo de ocasionar desperfectos.

Puede que aún se descubran nuevas tablas. Por desgracia, las reliquias existentes no están a salvo de peligros. Pocas semanas después de la visita de Symons y Cockcroft al Museo de Monumentos de Mallawi, este fue saqueado durante las revueltas civiles de 2013. Aunque parte de los objetos han podido recuperarse, el estado en que se encuentran las tablas de estrellas se desconoce. Tras volver a Egipto este año, Symons y Cockcroft pudieron completar sus estudios sobre las tablas que aún se conservan en otros museos, y seguirán documentando y analizando el legado astronómico del antiguo Egipto. Cada nuevo fragmento aporta información adicional y aumenta las posibilidades de conocer mejor la labor de los astrónomos de la antigüedad. Una razón más para conservar con celo lo que ya tenemos y para continuar buscando.

PARA SABER MÁS

A star's year: The annual cycle in the ancient egyptian sky. Sarah Symons en *Calendars and Years: Astronomy and Time in the Ancient Near East.* Dirigido por J. M. Steele. Oxbow Books, 2007.

Cultural heritage in times of crisis: The view from Egypt. Salima Ikram en *Journal of Eastern Mediterranean Archaeology and Heritage Studies*, vol. 1, n.º 4, págs. 366-371, 2013.

Base de datos de astronomía en el antiguo Egipto: **aea.physics.mcmaster.ca**

EN NUESTRO ARCHIVO

El origen de las constelaciones griegas. Bradley E. Schaefer en *IyC*, enero de 2007.

Las dos caras del tiempo. Jan Assmann en *IyC*, abril de 2011.

El observatorio solar más antiguo de América. Iván Ghezzi y Clive Ruggles en *IyC*, julio de 2011.

ESPACIO

SORPRESAS EN LOS CINTURONES DE VAN ALLEN

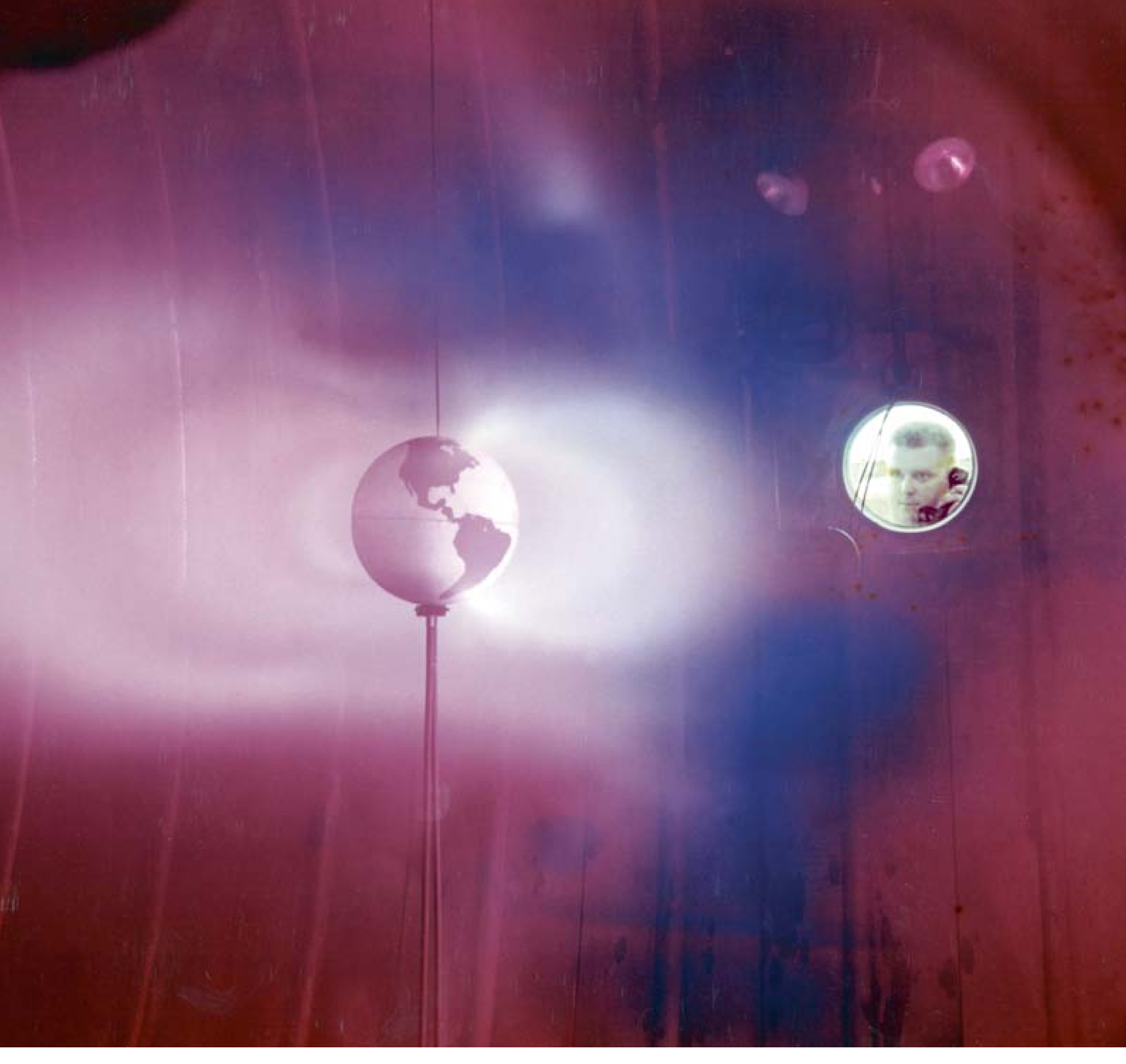
Los anillos de radiación que rodean nuestro planeta son más dinámicos de lo que se pensaba. Sus cambios podrían aumentar los daños causados por las tormentas solares

Daniel N. Baker

Entrada la noche del 31 de enero de 1958, un cohete Juno I de 29 toneladas partía desde Cabo Cañaveral para poner en órbita el primer satélite artificial estadounidense, el *Explorer I* (la Unión Soviética había lanzado el *Spútnik 2* casi tres meses antes). El ingenio portaba una innovadora carga científica preparada en la Universidad estatal de Iowa por un equipo dirigido por James A. Van Allen. Gracias a ella, el satélite logró el primer gran descubrimiento de la era espacial: la existencia de anillos de radiación de alta energía e intensidad alrededor de nuestro planeta.

Hoy conocidos como cinturones de Van Allen, el hallazgo reveló los efectos de la interacción entre el campo magnético terrestre y el entorno espacial. El campo, generado por la rotación del núcleo metálico fundido de la Tierra, da lugar a la magnetosfera, una burbuja magnética que envuelve a nuestro planeta. Su tamaño y forma cambian en función de la intensidad del viento solar, la corriente de partículas con carga eléctrica que nos llega desde el Sol. La vida en la Tierra depende de forma crítica de la magnetosfera, la cual protege la atmósfera y la superficie del viento solar y de los rayos cósmicos, aún más energéticos. En su interior, las líneas de campo magnético apresan y aceleran partículas, principalmente protones y electrones, y las hacen rebotar de un lado a otro entre los polos del planeta. Esas zonas de partículas atrapadas conforman los cinturones de Van Allen, los cuales adoptan la forma de dos toroides concéntricos: el interior se extiende desde los 1000 hasta los 6000 kilómetros de altitud, mientras que el exterior abarca aproximadamente desde los 13.000 hasta los 16.000 kilómetros.

Pero los cinturones de Van Allen son escudos imperfectos. Por un lado, las partículas más veloces pueden escapar y chocar contra la atmósfera, dando lugar a las auroras. Por otro, cuando en el Sol se produce una erupción magnética considerable, la avalancha de partículas resultante puede penetrar a través de la magnetosfera exterior y saturar los cinturones de Van Allen, con efectos más violentos. La rápida inyección de partículas en los anillos de radiación puede dañar



ANILLOS DE RADIACIÓN: En esta fotografía de 1966, un motor de plasma del Centro de Investigación Lewis de la NASA (hoy Centro de Investigación John H. Glenn) simula los cinturones de Van Allen, descubiertos pocos años antes. Una reciente misión de la NASA ha puesto de manifiesto que aún queda mucho por aprender sobre estos anillos de radiación y su impacto sobre la Tierra y los satélites en órbita.

NASA

los circuitos y los paneles solares de los satélites en órbita; además, el enjambre de protones y electrones liberados cuando las partículas del viento solar chocan contra la atmósfera induce corrientes eléctricas que pueden sobrecargar las redes terrestres y provocar apagones.

Casi un siglo antes del lanzamiento del *Explorer I*, en la noche del 28 al 29 de agosto de 1859, la población mundial fue testigo de hasta dónde pueden llegar los efectos de una tormenta solar. El *New York Times* relató cómo miles de neoyorquinos vieron «los cielos [...] ataviados con su ropaje más magnífico en años». Una aurora aún más espectacular tuvo lugar pocos días después, el 2 de septiembre, cuando el cielo del hemisferio norte llegó a iluminarse hasta en América Central. Las perturbaciones del campo magnético terrestre fueron tan intensas que los magnetómetros se saturaron. Las redes telegráficas quedaron fuera de servicio durante casi ocho horas en la mayor parte del mundo, debido a las partículas de alta energía presentes en la atmósfera. En algunas zonas, los operadores informaron de que sus telégrafos echaban chispas debido a la corriente eléctrica inducida por la aurora. Aquellas

tormentas solares asestaron a la Tierra el mayor golpe registrado hasta entonces.

En 1859, las técnicas y los aparatos eléctricos estaban en sus albores. No había líneas de alta tensión que cruzasen los continentes ni satélites en órbita. En 1989, justo antes del auge de Internet y del GPS, una tormenta solar menor, pero de intensidad considerable, puso de manifiesto que el peligro había aumentado. Quebec se quedó sin suministro eléctrico y unos 200 lugares de EE.UU. experimentaron problemas; sobre todo, aquellos emplazados sobre roca ígnea, que, debido a su elevada resistencia, tiende a dirigir la corriente hacia los cables cercanos. Si hoy viviésemos un acontecimiento similar al de 1989, las comunicaciones globales se resentirían durante días. Por otro lado, una supertormenta del calibre de la de 1859 podría llegar a inutilizar varias redes de distribución eléctrica y de comunicaciones durante semanas o incluso más tiempo.

La actividad del Sol sigue un ciclo de unos once años. El actual se encuentra en estos momentos cerca de su máximo, por lo que un fenómeno de gran magnitud podría tener lugar en cualquier momento. A mediados de julio de 2012, una tormenta solar de enorme potencia no afectó a nuestro planeta por muy poco: si se hubiese desencadenado una semana antes, la Tierra podría haberse encontrado en mitad de una gran ráfaga solar.

Hoy, varios investigadores nos dedicamos a analizar las tormentas espaciales y los cambios producidos en las inmediaciones de nuestro planeta, los cuales agrupamos bajo el nombre de «meteorología espacial». En nuestra sociedad tecnificada, existe una necesidad cada vez mayor de entender lo mejor posible cómo se comporta el entorno espacial de la Tierra, y una pieza importante en este rompecabezas es la dinámica de los cinturones de Van Allen.

METEOROLOGÍA ESPACIAL

Los incidentes sufridos por los satélites durante las tormentas espaciales tienen una gran importancia práctica. Después del trabajo inicial de Van Allen y sus colaboradores, así como los de sus colegas de profesión en la Unión Soviética, se disparó el interés por usar el espacio para satisfacer necesidades humanas. En un breve período de tiempo, entre finales de los años cincuenta y principios de los sesenta, la instrumentación espacial evolucionó desde la demostración tecnológica y la curiosidad científica hacia su aplicación en importantes ámbitos sociales. Se lanzaron satélites de comunicaciones, navegación, observaciones meteorológicas, teledetección de fenómenos terrestres y reconocimiento militar. En la actualidad, nuestro planeta se encuentra rodeado por todo tipo de naves espaciales que orbitan desde el límite de la atmósfera hasta altitudes de decenas de miles de kilómetros. Una sociedad moderna sin satélites se antoja casi inconcebible. Sin embargo, cualquiera de los cientos de aparatos hoy en órbita puede verse dañado por la radiación espacial si se dan las circunstancias adecuadas. En 2003, 46 de los 70 fallos que se detectaron en algunos de ellos se debieron a una tormenta geomagnética que tuvo lugar en octubre.

Daniel N. Baker es catedrático de física y ciencia planetaria y atmosférica en la Universidad de Colorado en Boulder, donde dirige el Laboratorio de Física Espacial y Atmosférica. Ha trabajado en varias misiones espaciales de la NASA; entre ellas, la de las Sondas Van Allen.



Cuando los protones y otros iones de alta energía impactan contra un satélite, a menudo dejan trazas de ionización en los microcircuitos, lo que puede alterar la memoria del ordenador de a bordo y dañar los equipos electrónicos. Como resultado, los paneles solares, los sistemas ópticos de seguimiento y los programas de gobierno y control de la nave corren el riesgo de deteriorarse. Las partículas de alta energía podrían herir o incluso provocar la muerte de los astronautas que se encontrasen en el espacio durante una emisión solar violenta. De hecho, varios lanzamientos tripulados han debido posponerse por este motivo, el cual supone un verdadero obstáculo para las misiones de larga duración, como un viaje a Marte. Los protones de alta energía de la zona interior de Van Allen, en concreto, constituyen un riesgo continuo tanto para los satélites como para los humanos.

Otra fuente de peligro se halla en los electrones energéticos del entorno espacial. Estas partículas pueden atravesar con facilidad el escudo de una nave y penetrar en los materiales aislantes de su interior, como cables coaxiales o tarjetas electrónicas. Como consecuencia, pueden generar una fuerte descarga eléctrica interna, semejante al impacto de un rayo en miniatura. Numerosos fallos recientes en naves espaciales se han atribuido a este fenómeno.

Un efecto adicional es el proceso de carga superficial. Los electrones de menor energía no pueden atravesar el escudo de una nave, pero sí acumularse sobre su superficie aislante. Ello puede provocar una intensa descarga y generar señales eléctricas en la vecindad del satélite que perturben y desorienten la nave y sus subsistemas.

EL TERCER CINTURÓN

Las naves espaciales en órbita se desplazan, básicamente de forma continua, a través del entorno de radiación de alta energía descubierto hace más de cinco décadas por el grupo de Van Allen. Los datos obtenidos por las sondas muestran que la intensidad de estas zonas de radiación aumenta y disminuye en función de las condiciones locales y de la actividad solar. A pesar del tiempo transcurrido desde su descubrimiento, aún necesitamos entender mejor la dinámica de los cinturones de Van Allen.

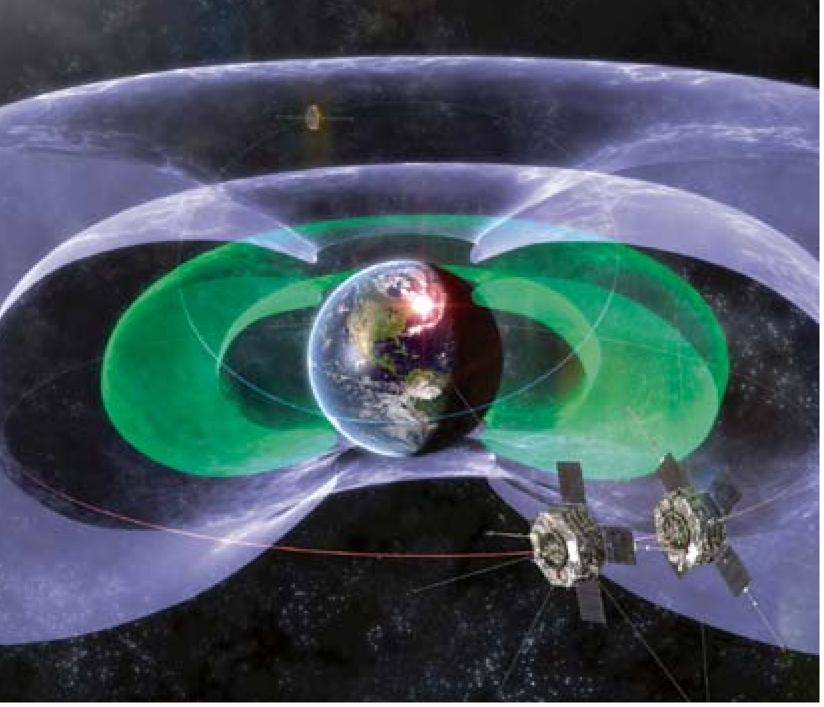
Hace aproximadamente una década, la NASA comenzó a desarrollar el programa Viviendo con una Estrella. Su nombre buscaba recalcar el hecho de que la Tierra se encuentra inmersa

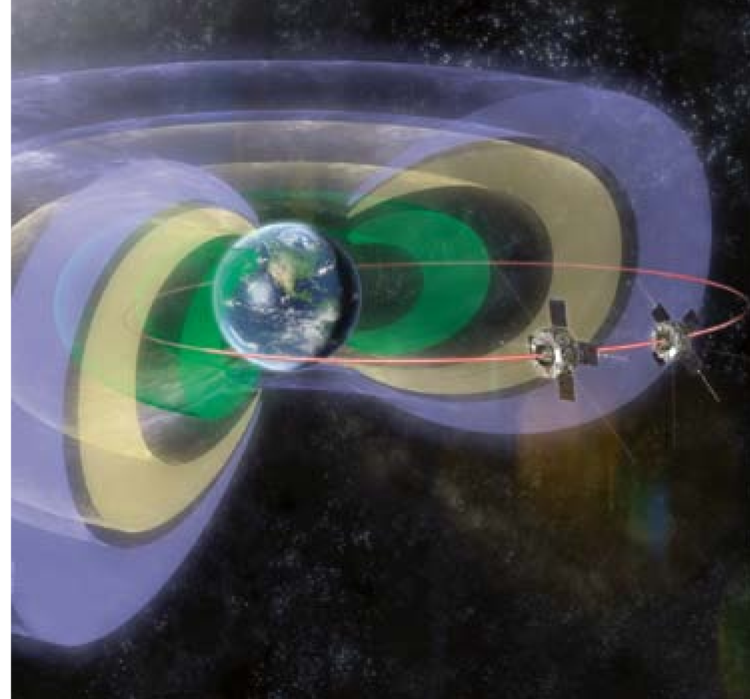
EN SÍNTESIS

Nuestro planeta se encuentra rodeado por los cinturones de Van Allen, anillos de radiación en los que circulan electrones y protones de alta energía. Estas estructuras se forman por los efectos que induce la magnetosfera terrestre.

A pesar de que fueron descubiertos hace más de 50 años, buena parte de su dinámica aún se desconoce. Su tamaño e intensidad puede cambiar con rapidez debido al viento solar y a las eyecciones de masa coronal que tienen lugar en el Sol.

Una reciente misión de la NASA ha estudiado sus propiedades con mayor detalle que nunca. Los datos han revelado los mecanismos de aceleración que tienen lugar en las zonas de radiación y la existencia de un tercer cinturón transitorio.





UN NUEVO CINTURÓN: Hasta hace poco se creía que los cinturones de Van Allen eran dos anillos concéntricos de partículas de alta energía (*izquierda*). Las sondas Van Allen (*en la imagen*) han mostrado que las tormentas solares pueden desencadenar la formación temporal de un tercer cinturón (*derecha, amarillo*).

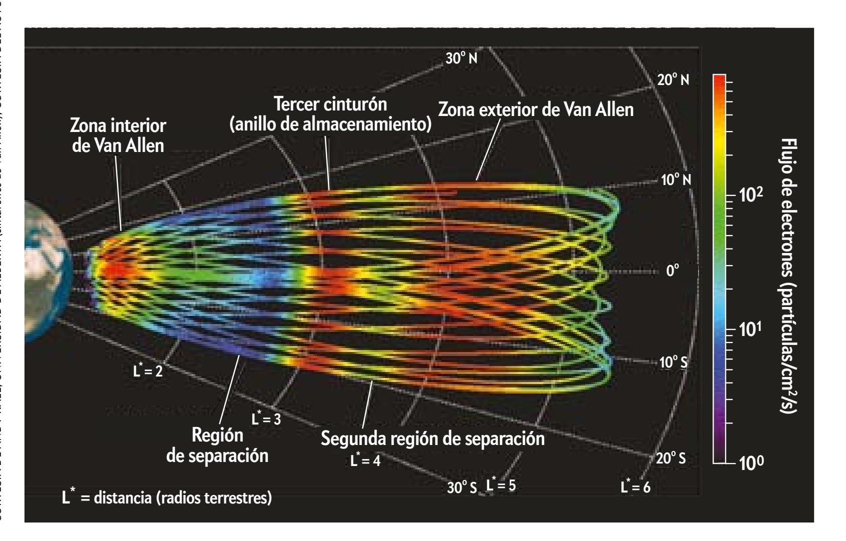
en la atmósfera exterior de una estrella magnéticamente activa, el Sol, el cual ejerce un enorme impacto sobre nuestro entorno. Por supuesto, dependemos de su calor y su luz, pero también hemos de sufrir sus ataques de ira cuando emite descomunales ráfagas de rayos X durante una llamarada solar, o cuando expulsa 10.000 millones de toneladas de plasma como consecuencia de una eyección de masa coronal. Las violentas tormentas solares pueden, a su vez, incrementar en un grado extraordinario la intensidad de los cinturones de Van Allen, aumentando su peligrosidad durante días o incluso semanas.

La fase operativa del programa comenzó el 11 de febrero de 2010 con el lanzamiento del Observatorio de la Dinámica Solar. Esta nave espacial ha estado enviando ingentes cantidades de datos sobre el Sol y su atmósfera exterior, la corona, así como imágenes verdaderamente sobrecogedoras por su belleza y detalle.

La segunda fase, denominada en un principio Sondas para las Tormentas en los Cinturones de Radiación, y posteriormente rebautizada como Sondas Van Allen, se centró en el estudio de los cinturones de radiación. Para ello se lanzaron dos naves espaciales gemelas, las cuales deberían trazar grandes órbitas elípticas ecuatoriales a fin de recorrer por completo ambos cinturones, el interior y el exterior. Con una duración programada de varios años, la misión examinaría las regiones de Van Allen con un detalle nunca antes alcanzado. Las sondas fueron lanzadas el 30 de agosto de 2012.

En la mayoría de las misiones espaciales de la NASA, los equipos experimentales suelen esperar varios meses después del lanzamiento a ponerse en marcha. Durante ese tiempo se van activando uno a uno los instrumentos de a bordo, se llevan lentamente a su máxima potencia y se comprueba si trabajan a pleno rendimiento. Ese era también el protocolo previsto con las sondas Van Allen. Sin embargo, mi equipo de investigación solicitó que nuestro instrumento, el Telescopio de Electrones y Protones Relativistas (REPT), se activase tres días después del lanzamiento. La prisa obedecía a que otro satélite de observación del Sol, el Explorador de Partículas Solares Magnetosféricas y Anómalas (SAMPEX), estaba a punto de efectuar su reentrada en la atmósfera terrestre y ser destruido. Queríamos que las tomas de datos de ambas misiones se solapasen a fin de disponer de datos calibrados continuos. La NASA accedió a nuestra petición.

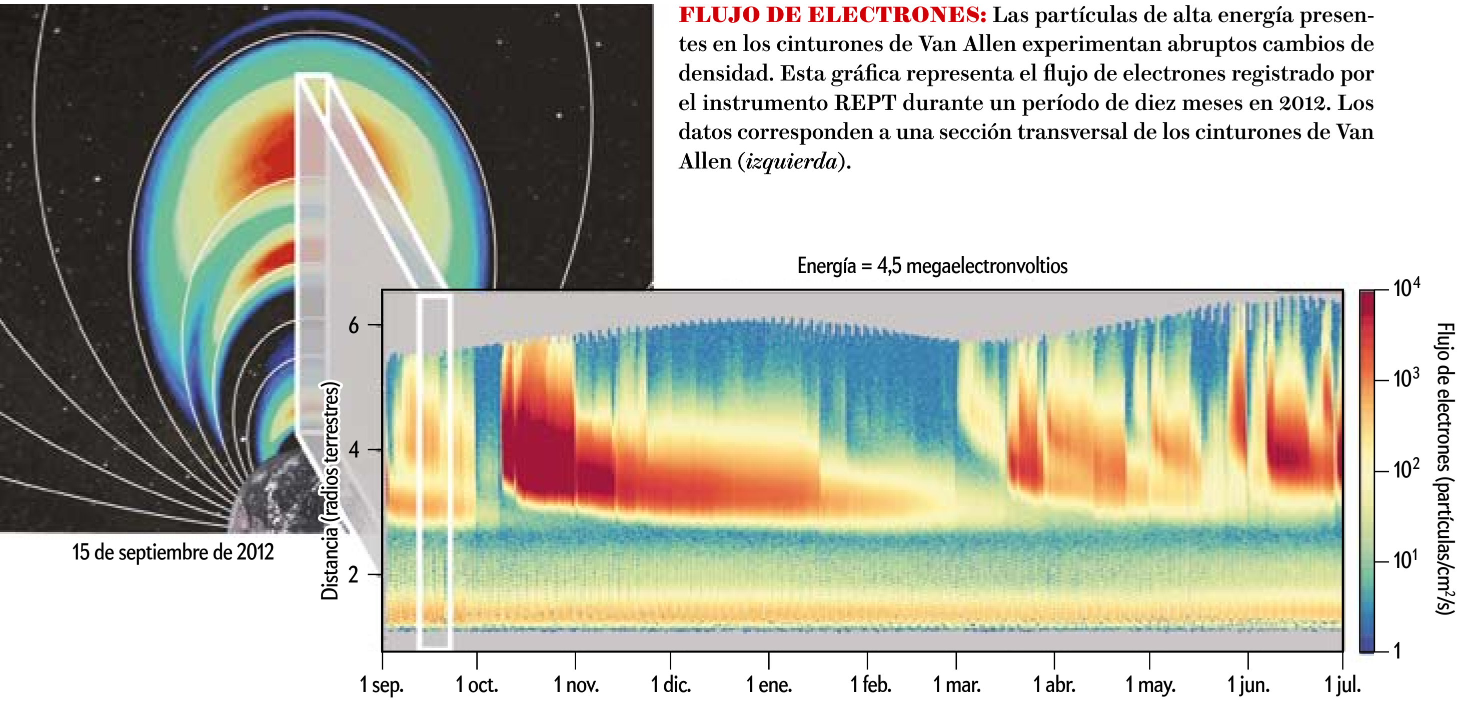
Fue una decisión afortunada. El 31 de agosto de 2012, justo antes de que se activase el REPT, tuvo lugar la erupción de un largo filamento de plasma solar, lo que propagó una potente per-



PARTÍCULAS EN ÓRBITA: El tercer cinturón fue detectado pocos días después del lanzamiento de las sondas Van Allen por el telescopio de a bordo REPT. En esta imagen, la distribución espacial de los electrones de alta energía (*colores*) aparece representada sobre las órbitas trazadas por las sondas.



FLUJO DE ELECTRONES: **Las partículas de alta energía presentes en los cinturones de Van Allen experimentan abruptos cambios de densidad. Esta gráfica representa el flujo de electrones registrado por el instrumento REPT durante un período de diez meses en 2012. Los datos corresponden a una sección transversal de los cinturones de Van Allen (*izquierda*).**



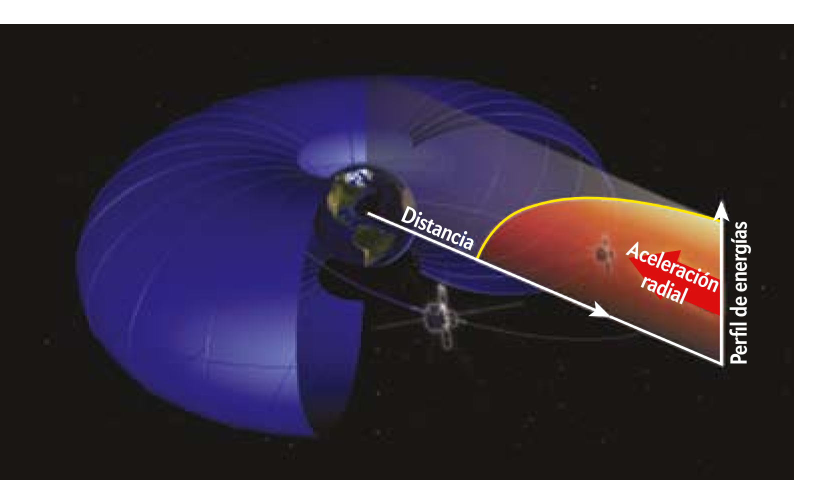
turbación desde la corona solar hacia la Tierra. Cuando, un día después, aquella tormenta comenzó a alcanzar nuestro planeta, impactó contra los cinturones de radiación y modificó su estructura de manera drástica. Para la satisfacción de nuestro equipo, los instrumentos del REPT funcionaron de forma correcta desde el momento en que se activaron, el 1 de septiembre. El telescopio detectó partículas aceleradas que habían quedado atrapadas en los cinturones y midió sus energías mientras aumentaba el tamaño y la intensidad de las zonas de radiación.

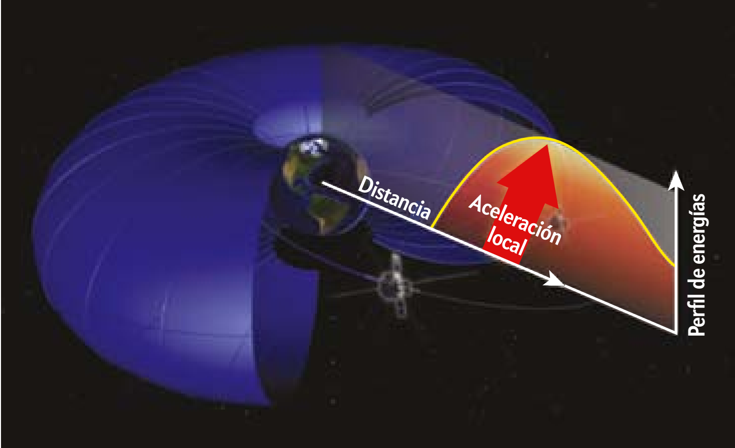
Entonces sucedió algo insólito. Las partículas adoptaron una nueva configuración, la cual reveló la aparición de un tercer cinturón entre los dos ya conocidos. Unos días después de su lanzamiento, las sondas Van Allen ya habían efectuado un descubrimiento que obligaba a reescribir los libros de texto. En nuestras publicaciones bautizamos este tercer cinturón como «anillo de almacenamiento». Registramos la variación espacial y temporal de las zonas de radiación durante el primer año y hallamos fascinantes ejemplos de aceleraciones súbitas de los electrones, largos períodos de transporte radial de las partículas energéticas hacia el interior y sorprendentes pérdidas abruptas de electrones.

MECANISMOS DE ACELERACIÓN

Las sondas Van Allen nos han permitido estudiar los cinturones de radiación con una claridad y profusión sin precedentes. Por un lado, hemos cosechado una gran cantidad de datos; por otro, poder observar los cinturones desde dos naves independientes ha permitido analizar mucho mejor la manera en que los eventos barren la zona con el transcurso del tiempo. La aparición de un tercer cinturón reveló que las partículas de muy alta energía pue-

CORTESÍA DEL AUTOR (*flujo de electrones*); G. REEVES/M. HENDERSON/NASA (*mecanismos de aceleración*)





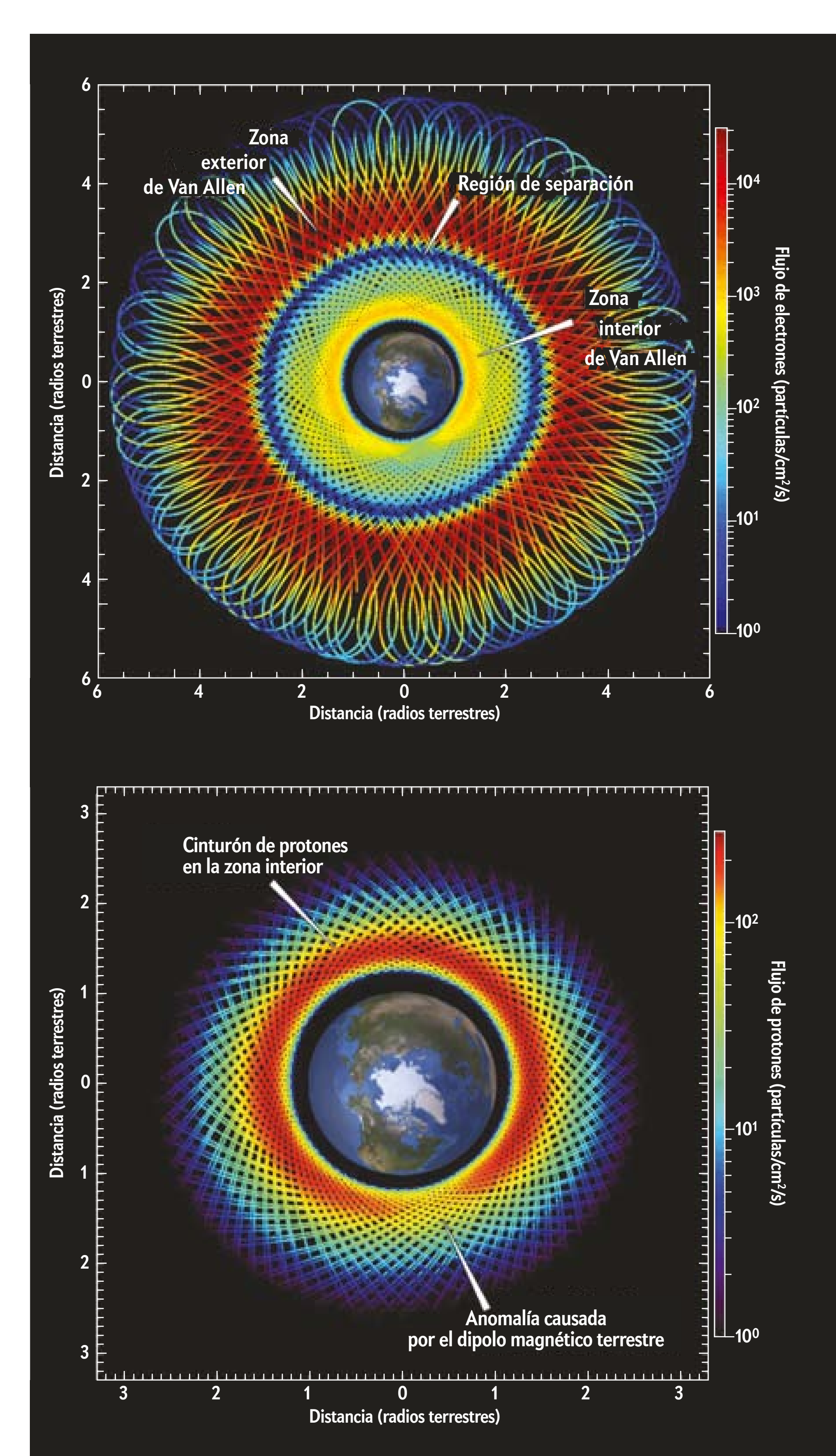
MECANISMOS DE ACELERACIÓN: **Se han propuesto dos teorías para explicar la aceleración de las partículas en los cinturones de Van Allen. Estas podrían difundirse lentamente hacia el interior desde la magnetosfera (*izquierda*) o experimentar una fuerte aceleración local en la zona más interna del cinturón exterior (*derecha*).**

den aparecer y desaparecer en un abrir y cerrar de ojos. Y, en una región del espacio que guarda tantos misterios, toda nueva observación aporta una pieza más al viejo rompecabezas sobre el mecanismo que impulsa los cinturones de Van Allen.

Las sondas han permitido esclarecer varios detalles que hasta hace poco no pasaban de meras especulaciones. Durante los años siguientes al descubrimiento de los cinturones, los investigadores formularon la teoría de que los electrones provenían de los límites de la magnetosfera terrestre. Se propuso que, a medida que las partículas se acercaban a la Tierra y se encontraban con un campo magnético más intenso, los electrones se acelerarían y darían lugar a una configuración con forma de anillo. Sin embargo, dicho proceso tardaría días o semanas en completarse, por lo que describiría mejor cinturones de radiación que cambiasen de manera gradual con el tiempo.

En los años noventa, satélites como SAMPEX pusieron de manifiesto que la energía y la densidad de los cinturones de Van Allen podían variar mucho más rápido. Como consecuencia, comenzó a tomar forma una nueva teoría para explicar el origen de los electrones de las zonas de radiación. Se sugirió que las partículas con carga eléctrica no procedían de regiones lejanas, sino que se generaban de manera local en el interior del cinturón exterior. Eso ocurriría cuando los campos eléctricos en el seno de los cinturones captasen electrones de baja energía, omnipresentes en el espacio, y los acelerasen a velocidades próximas a la de la luz. Dicho proceso podría alterar la densidad y la energía de los cinturones en una escala temporal de entre segundos y horas, lo que casaba mejor con las observaciones. Por desgracia, los datos tomados por aquellos satélites eran demasiado escasos en lo referente a su cobertura espacial. Además, los instrumentos no estaban diseñados para medir aquellas propiedades de los cinturones que varían con rapidez en distintos lugares, una condición necesaria para distinguir sin ambigüedad entre los dos mecanismos de aceleración propuestos.

Esa situación cambió por completo tras el lanzamiento de las sondas Van Allen. A principios de octubre de 2012, una semana después de que una tormenta solar barriese el cinturón exterior y lo dejase prácticamente vacío de electrones de alta energía, las naves gemelas registraron un aumento en la densidad de electrones de casi tres órdenes de magnitud en menos de 12 horas. Aquellas observaciones sugerían que eran los campos eléctricos en el interior del cinturón los que aceleraban los electrones. Sin embargo, en una investigación efectuada junto con mis colaboradores y publicada a principios de 2014, mostramos que los fenómenos del cinturón exterior tienen lugar en dos escalas de tiempo muy diferentes. En un intervalo de meses, las partículas lo abandonan mediante un proceso de difusión gradual hacia el interior; después, la fuerte actividad del viento solar lo re-



ELECTRONES Y PROTONES: La estructura de los cinturones de Van Allen puede visualizarse a partir de las partículas registradas por las sondas Van Allen en el curso de sus órbitas. Esta proyección de las trayectorias muestra el flujo de electrones en ambas zonas de radiación (*arriba*) y el de protones en la región interior (*abajo*).

CORTESÍA DEL AUTOR

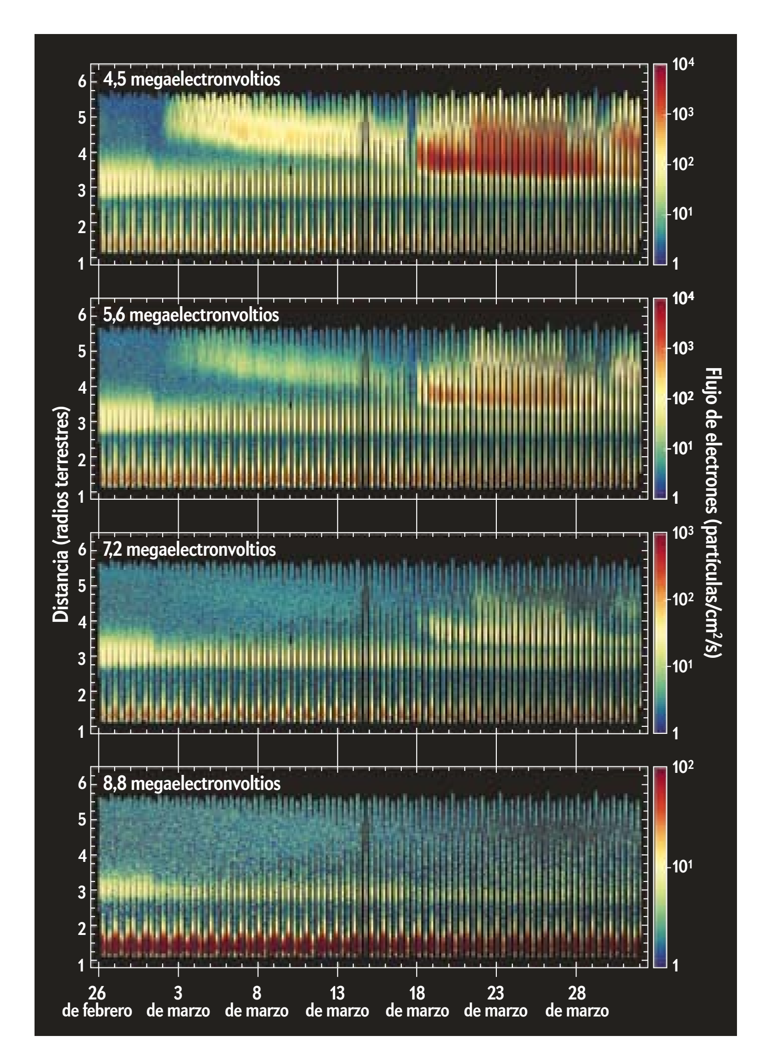
puebla con rapidez. Así pues, en los cinturones conviven varios mecanismos de aceleración que actuarían a menudo de manera simultánea o, al menos, en rápida sucesión.

Los datos registrados durante el evento de octubre de 2012 nos han permitido distinguir con facilidad varios procesos de aceleración. Nuestras medidas demostraron con claridad que las partículas podían aumentar su energía de forma local en el núcleo de la zona exterior de radiación. La frecuencia de algunas de las ondas electromagnéticas que se propagan por el cinturón coincide con la de giro de los electrones en torno al campo magnético local, una sincronía que facilita la aceleración de las partículas.

Varios compañeros de la Universidad de California en Berkeley, bajo la dirección de Forrest Mozer, publicaron en julio de 2014 un trabajo basado en análisis de datos y simulaciones por ordenador según el cual la aceleración a altas energías tendría lugar en dos fases. Primero, los pulsos de muy corta duración del campo eléctrico del cinturón conferirían una velocidad relativamente modesta a las partículas, las cuales adquirirían la energía correcta para entrar en resonancia con un tipo de onda electromagnética apodada «silbador» (*whistler*). Después, varias interacciones con dichas ondas aumentarían la energía de las partículas hasta niveles muy elevados. En 2013, nuestro equipo había publicado un análisis que demostraba de manera concluyente la implicación de estas ondas electromagnéticas en la aceleración de las partículas.

La representación gráfica de las mediciones relativas a los cinturones de Van Allen plantea todo tipo de retos, por lo que en nuestro grupo experimentamos continuamente con nuevas técnicas de visualización de datos. Una de nuestras imágenes muestra las trayectorias de las dos sondas mientras se mueven a través de las diferentes zonas de radiación (*véase la figura de la página anterior*). Los satélites rotan alrededor de la Tierra en órbitas elípticas, formando un patrón espiral según se observa desde un sistema de coordenadas fijo centrado en la Tierra. Los datos, que miden el flujo de electrones y protones de alta energía, se proyectan sobre el plano ecuatorial, por lo que el patrón orbital resultante recuerda al dibujo de un espirógrafo. Las franjas de color revelan una baja población de electrones en la zona interior de Van Allen, la región de separación entre los cinturones y la relativamente estable (al menos durante el tranquilo intervalo de seis semanas durante las que se tomaron estos datos) zona exterior de Van Allen. En la representación pueden distinguirse varios detalles, como la relativa escasez del flujo de electrones energéticos sobre el sector americano, un efecto que creemos relacionado con la inclinación del dipolo magnético terrestre.

Un examen de los perfiles de flujo revela que, para el período examinado (del 2 de noviembre al 15 de diciembre de 2012), los electrones energéticos reflejaban con claridad la familiar estructura de dos cinturones. Los protones de muy alta energía, por el contrario, se ven solo en la zona interior de Van Allen, más próxima a la Tierra. Los datos relativos a los protones muestran la región interior del cinturón y varias asimetrías longitudinales asociadas al dipolo magnético terrestre, lo que también provoca una aparente reducción del flujo de partículas sobre el sector norteamericano.



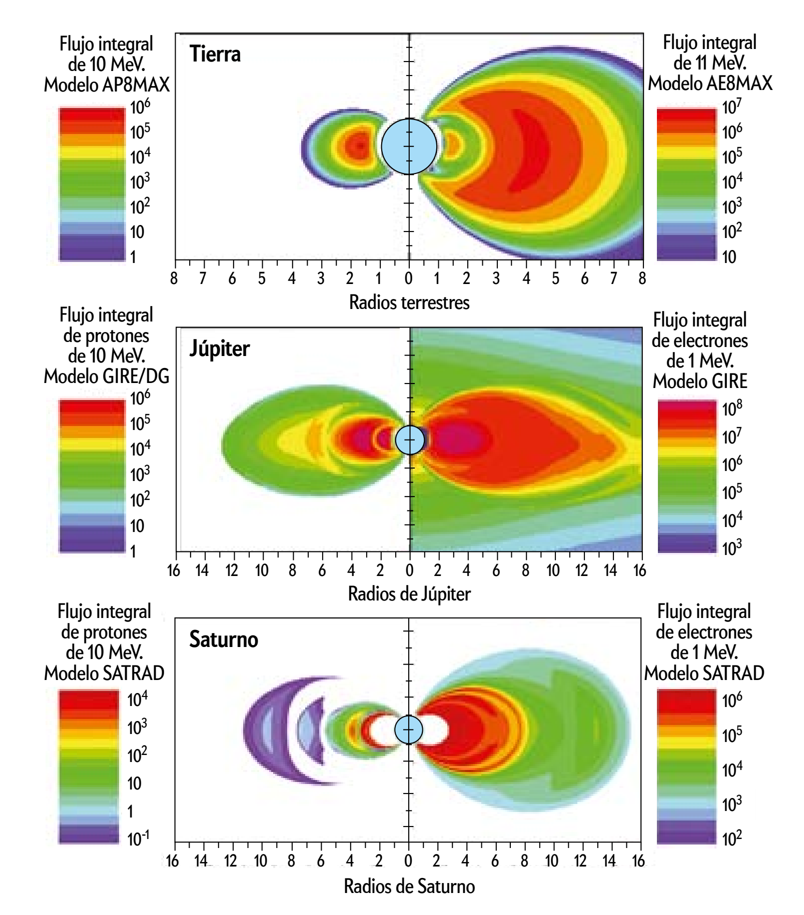
TORMENTA ESPACIAL: En marzo de 2013, una tormenta solar indujo de nuevo la formación del fantasmagórico tercer cinturón, o anillo de almacenamiento, durante unas semanas. Estas gráficas muestran los datos obtenidos por el instrumento REPT en cuatro bandas de energía.

CORTESÍA DEL AUTOR

UN MES ESCLARECEDOR

Las sondas Van Allen han demostrado las ventajas de medir electrones altamente relativistas con dos sondas espaciales situadas cerca del ecuador. Su excelente resolución temporal, espacial y energética ha desempeñado un papel clave en la obtención de los resultados. Cuando el viento solar se encuentra en calma, con velocidades de entre 300 y 600 kilómetros por segundo, el cinturón exterior se caracteriza por un transporte difusivo lento y constante, así como por una pérdida gradual de partículas. Sin embargo, una mayor influencia del viento solar, provocada por un aumento de su velocidad (a valores de más de 500 kilómetros por segundo) o por una eyección de masa coronal, produce un rápido aumento en la energía y densidad de las partículas.

Los datos de las sondas han aclarado la íntima relación entre la acción externa del viento solar y la aceleración y el transporte de las partículas en el interior de la magnetosfera, tanto por el viento solar como por las tormentas geomagnéticas causadas por eyecciones de masa coronal. Al respecto, los datos registrados en marzo de 2013 resultaron de especial interés. A principios de ese mes, un evento asociado a una corriente solar de más de



MAGNETISMO EXTRATERRESTRE: Otros planetas del sistema solar, como Júpiter y Saturno, tienen zonas de radiación propias. Un conocimiento más completo de los cinturones terrestres puede ayudar entender mejor la magnetosfera de otros mundos, representada aquí según varios modelos (*los planetas no se muestran a escala*).

ADAPTADO DE UNA ILUSTRACIÓN DE HENRY GARRETT, LABORATORIO DE PROPULSIÓN A CHORRO DE LA NASA

650 kilómetros por segundo provocó una fuerte aceleración de electrones centrada a una distancia de unos cinco o seis radios terrestres, o 35.000 kilómetros. Una población de electrones de alta energía se formó al paso de una rápida corriente solar. Durante las dos semanas siguientes, nuestro equipo observó cómo el núcleo de la población de electrones se difundía hacia el interior en dirección radial y, al mismo tiempo, una disminución gradual de flujo magnético, lo que sugería una pérdida de partículas débil pero continua.

La paulatina relajación de ese largo y difusivo suceso de aceleración experimentó un brusco final el 17 de marzo de 2013, cuando una potente onda de choque interplanetaria impactó contra la magnetosfera terrestre. La velocidad del viento solar aumentó de 425 a 725 kilómetros por segundo, y el campo magnético asociado a él registró cambios notables. En un primer momento se produjo un vaciado considerable del cinturón de radiación, pero, después, y casi con la misma rapidez, reapareció una población de partículas aparentemente nueva en las profundidades del cinturón exterior: un evento que recordaba al acaecido en octubre de 2012.

Varias observaciones y experimentos con los magnetómetros de a bordo mostraron que, durante los dos sucesos de marzo de 2013, los límites de la magnetosfera se vieron empujados profundamente hacia el interior, en dirección a la Tierra. Así pues, la aceleración de electrones relativistas sucede cuando —y quizá solo cuando— la zona exterior de Van Allen se encuentra en una posición muy externa con respecto a su localización usual en la magnetosfera. Solo entonces las ondas electromagnéticas pueden interaccionar con las partículas «germinales» de mucha menor energía necesarias para la producción de electrones relativistas.

CINTURONES EN OTROS MUNDOS

Las sondas Van Allen no solo nos han permitido investigar con detalle el eficiente acelerador de partículas que circunvala nuestro planeta. Sus datos también nos permiten entender mejor los procesos equivalentes que tienen lugar en otros mundos. Los cinturones de radiación terrestres pueden usarse como laboratorio local para analizar los mecanismos de aceleración y transporte de partículas, y aplicar esos conocimientos a otros planetas con magnetosferas intensas, como Júpiter, Saturno y Mercurio, así como a los miles de exoplanetas que se están descubriendo alrededor de otras estrellas. Tales resultados podrían servir incluso para estudiar el potente campo magnético de las estrellas de neutrones (el remanente ultradenso de muchas explosiones de supernova) y, quizá, el confinamiento magnético de corrientes de plasma a escalas galácticas.

En los más de 50 años transcurridos desde el lanzamiento del *Explorer I*, nuestro conocimiento del entorno magnético y de las partículas de alta energía que rodean la Tierra se ha incrementado de forma notable. Las sondas de la NASA y sus hallazgos sobre esta peligrosa región del espacio honran a James Van Allen y sus descubrimientos. Los nuevos resultados, combinados con la información procedente de otros satélites, ya se están usando para mejorar los modelos informáticos que incorporan datos de la actividad espacial en tiempo real y que ayudan a pronosticar lo que sucede en las inmediaciones de nuestro planeta. Estudiar con otra perspectiva cualquier sistema físico, incluso aquellos que creemos conocer muy bien, puede redundar en nuevos y sorprendentes hallazgos, una posibilidad que representa uno de los aspectos más maravillosos de la investigación espacial.

PARA SABER MÁS

A long-lived relativistic electron storage ring embedded in Earth's outer Van Allen belt. D. N. Baker et al. en *Science*, vol. 340, págs. 186-190, abril de 2013.

Electron acceleration in the heart of the Van Allen radiation belts. G. D. Reeves et al. en *Science*, vol. 341, págs. 991-994, agosto de 2013.

The Relativistic Electron-Proton Telescope (REPT) instrument on board the Radiation Belt Storm Probes (RBSP) spacecraft: Characterization of Earth's radiation belt high energy particle populations. D. N. Baker et al. en *Space Science Reviews*, vol. 179, págs. 337-381, noviembre de 2013.

James Van Allen and his namesake NASA mission. D. N. Baker et al. en *Eos, Transactions of the American Geophysical Union*, vol. 94, págs. 469-470, diciembre de 2013.

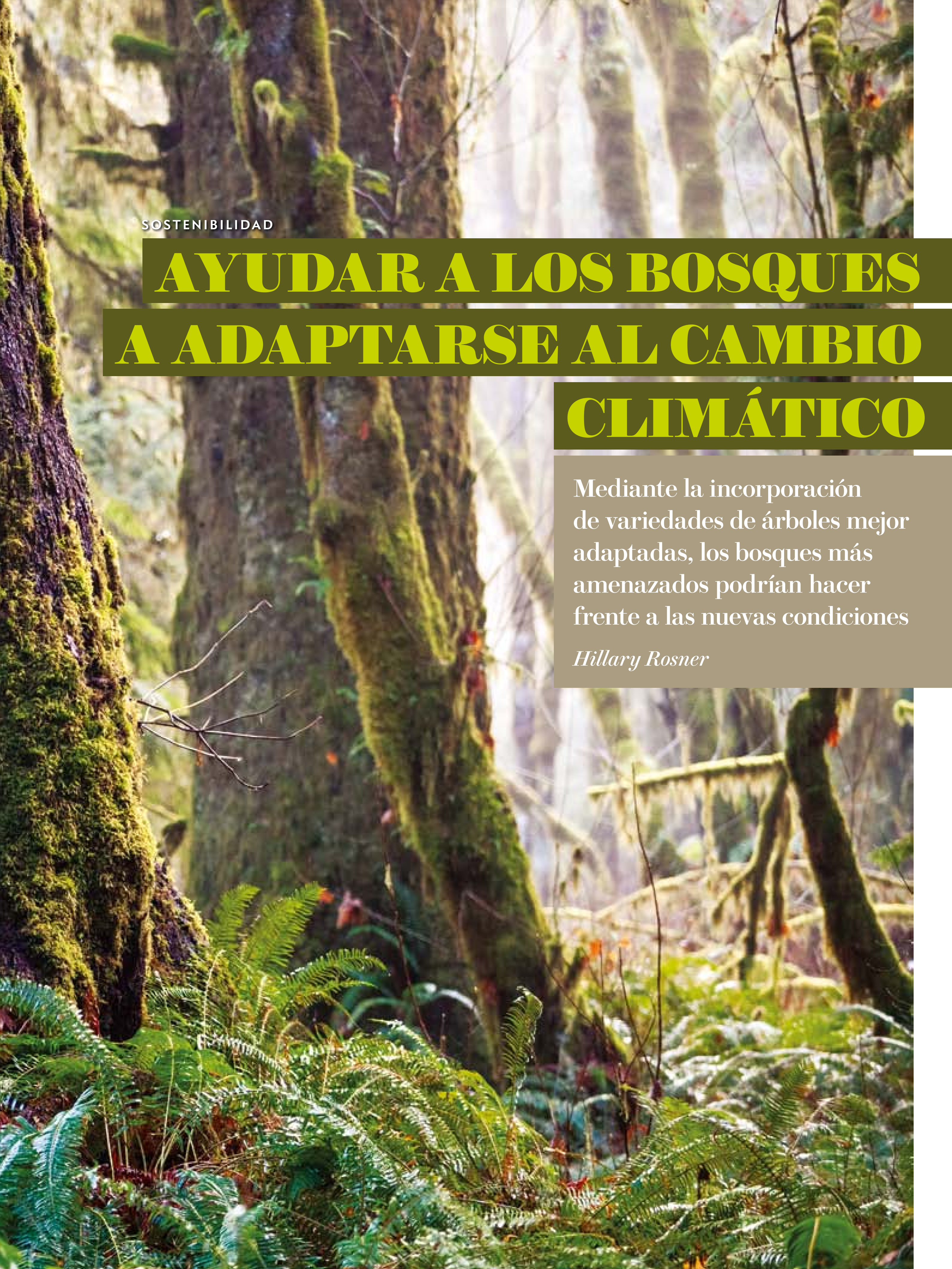
Direct observation of radiation-belt electron acceleration from electron-volt energies to megavolts by nonlinear whistlers. F. S. Mozer et al. en *Physical Review Letters*, vol. 113, pág. 035001, julio de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Supertormenta solar. Sten F. Odenwald y James L. Green en *IyC*, octubre de 2008.



ADAPTARSE O MORIR: La picea de Sitka en la Columbia Británica puede necesitar tomar prestados genes de árboles de clima más cálido.



AYUDAR A LOS BOSQUES A ADAPTARSE AL CAMBIO CLIMÁTICO

Mediante la incorporación de variedades de árboles mejor adaptadas, los bosques más amenazados podrían hacer frente a las nuevas condiciones

Hillary Rosner

Hillary Rosner es redactora científica. Ha escrito para *National Geographic*, *New York Times* y *Wired*, entre otras publicaciones.



En un campo en Vancouver, frente a una hilera de casas blancas, unas quinientas tupidas piceas de Sitka crecían hacia el sol. En un día de primavera de 2013, los árboles, con apretadas agujas triangulares de color verde oscuro, se apiñaban de modo irregular. Aunque todas se habían plantado al mismo tiempo, siete años antes, su altura variaba igual que la de unos escolares reunidos para una fotografía de grupo.

Los árboles de menor altura, de unos sesenta centímetros, procedían de la isla de Kodiak, en Alaska; el más alto, de casi dos metros, era originario de Oregón. El tamaño no era la única diferencia visible. Los abetos de Alaska producían brotes tres meses antes que los de Oregón. También se conservaban verdes y saludables por mucho que descendiera la temperatura.

Los abetos se habían introducido en este campo, en un extremo del campus de la Universidad de la Columbia Británica, como un experimento para poner de relieve el modo en que se adaptan los árboles a los ambientes locales. Puede sonar obvio que las plantas se ajustan al entorno. Pero conocer con detalle cómo lo hacen resulta importante si se piensa en una amenaza inminente: los hábitats están transformándose a medida que el planeta se calienta, y los árboles no pueden simplemente levantarse y caminar a un nuevo hogar. Si una especie no se transforma al ritmo de un clima cambiante, está condenada.

Debido a que los árboles no pueden reubicarse por sí mismos, se está explorando una solución novedosa: reubicar su ADN. Por este motivo, Sally N. Aitken, directora del Centro para la Conservación Genética del Bosque de la universidad plantó el jardín de piceas. La experta cree que la salvación de los bosques de la Columbia Británica (y de otras partes del mundo) quizá dependa de una práctica llamada flujo genético asistido. Consiste en trasladar organismos con rasgos particulares de una parte a otra de su área de distribución natural y podría ayudar a las especies a adaptarse a las condiciones futuras. El árbol de Oregón y el de Alaska tal vez alberguen por separado ciertos genes que podrían aportar beneficios a ambos. Pero, sin una intervención, nunca coincidirían en un mismo individuo.

Al igual que un casamentero arbóreo, un técnico forestal podría tomar semillas de abetos o pinos de Oregón a una baja altitud y plantarlos pendiente arriba en otro lugar. Conforme las temperaturas en las laderas se vuelven más cálidas, los árboles reubicados podrían crecer y cruzarse con sus homólogos locales, con lo que propagarían sus genes adaptados al calor y ayudarían al bosque a reajustarse. El flujo genético asistido proporciona a los árboles una baza evolucionaria.

Pero no se puede tomar simplemente un árbol de Oregón, plantarlo a más de mil kilómetros de distancia en el norte de la Columbia Británica y esperar a que el mercurio suba. La razón de ello la hallamos en las mismas adaptaciones genéticas locales que hacen atractiva la idea del flujo genético. La especie *Pinus contorta*, por ejemplo, crece en diferentes regiones de gran parte de la provincia canadiense. Sus genes ayudan a algunos árboles a tolerar mejor el calor, el frío o la sequía, o a defenderse de enfermedades o plagas locales. Si un frente frío del Ártico cruza Vancouver y azota los árboles trasplantados de regiones más cálidas, estos sufrirán. «Necesitamos empezar a actuar con pasos muy pequeños», comenta la responsable. «Los cambios proyectados para las próximas décadas son importantes, pero todavía registramos muchas variaciones anuales, mensuales y semanales que esos árboles tienen que sobrellevar.»

Averiguar cómo ajustar las semillas de hoy al clima del futuro no es una tarea fácil. Pero en la Columbia Británica, donde los recursos forestales suponen un tercio de todas las exportaciones y los bosques comerciales representan casi la mitad de la cubierta forestal total, este conocimiento resulta vital. La ley provincial exige que los bosques sean replantados después de la tala, para reforzar la futura oferta de madera y mantener los ecosistemas saludables. Cada año se plantan unos 250 millones de plántulas. El lugar de donde deben proceder las semillas y hasta dónde pueden o deben desplazarse son dos cuestiones complicadas y apremiantes. Si se hace mal, podríamos estar condenando a los bosques en las próximas décadas.

El experimento de Aitken con la picea de Sitka, en el que se usaron árboles de 14 lugares diferentes, desde California central hasta Alaska, constituía un pequeño estudio demostrativo antes de iniciar un esfuerzo mayor que intenta evitar ese fatal paso en falso. La investigación permitió identificar 35 segmentos del ADN asociados a la tolerancia a la sequía y al tiempo de brote. Ahora, Aitken y su equipo están analizando genomas de más árboles para descubrir los genes responsables de proteínas vinculadas a otros rasgos ambientales. Su esperanza es que las versiones beneficiosas de estos genes, llamados alelos, se extiendan entre las poblaciones que necesitan los rasgos y que ello se

EN SÍNTESIS

Los bosques se adaptan genéticamente para sobrevivir en condiciones locales, pero el clima está cambiando más deprisa que la capacidad de ajuste de los árboles.

Para evitar la degradación de los bosques, los científicos trasladan árboles con genes asociados al uso del agua y a la tolerancia al calor y los plantan junto a otros que necesitan este ADN para que se crucen con ellos.

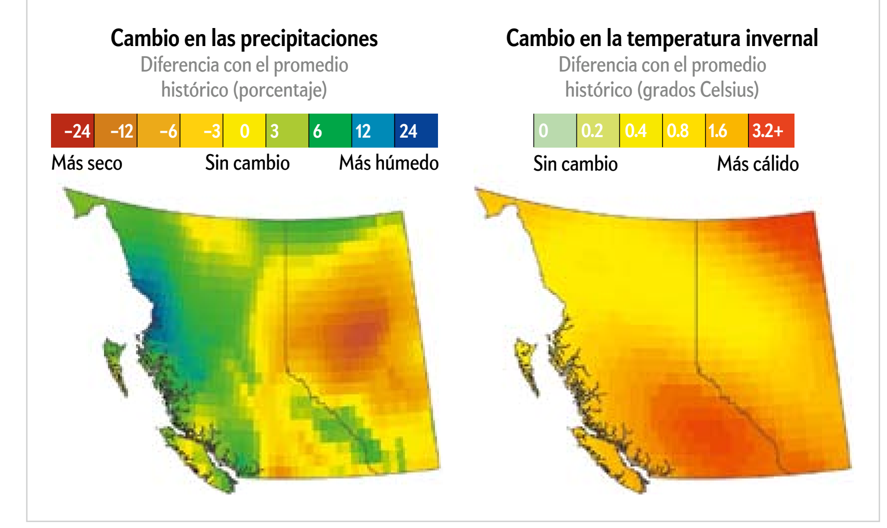
Esta estrategia, denominada flujo genético asistido, está ensayándose con árboles de diferentes zonas climáticas de la Columbia Británica.

PÁGINAS ANTERIORES: TJ WATT

ECOLOGÍA FORESTAL

El bosque cambia con el clima

Los científicos han comparado el pasado con el presente para averiguar las tendencias climáticas recientes en la Columbia Británica y Alberta y ver si guardan alguna relación con cambios que experimentaron los árboles durante la segunda mitad del siglo XX. Recopilaron observaciones directas del período entre 1961 y 1990 de las estaciones meteorológicas de ambas provincias y las contrastaron con datos promedio de un período más reciente, entre 1997 y 2006. En este último examinaron si los valores reflejaban un tiempo más húmedo, más seco o más cálido, o no habían variado respecto al período anterior. Han descubierto así que el clima se ha vuelto mucho más húmedo a lo largo de la costa del Pacífico, un hecho que vinculan con brotes de una plaga, antes infrecuente, que afecta a las acículas de pino. Al mismo tiempo, se ha vuelto más seco en el interior, lo que puede explicar la muerte de piceas y álamos en esa zona. Los inviernos han sido más cálidos en ambas provincias, lo que ha permitido al mortal escarabajo del pino extenderse a más bosques. (Los métodos de este análisis fueron publicados en *Agricultural and Forest Meteorology* en 2009.)



ANDREAS HAMANN (*mapas*)

produzca de manera más o menos sincrónica con los cambios climáticos, de tal modo que esos genes resulten útiles.

El proyecto mayor, llamado AdapTree, allanaría el camino para futuros proyectos sobre flujo genético asistido en todo el mundo, tarea que, a su vez, podría ayudar a especies clave de otros ecosistemas. Los corales en el mar, por ejemplo, ofrecen alimentación y proporcionan refugio a todo tipo de especies. Investigadores de EE.UU., Abu Dhabi, Qatar y Australia han sugerido trasladar corales del golfo Pérsico a la región indo-pacífica para contribuir a difundir los genes de tolerancia al calor. Y en el medio oeste estadounidense, los esfuerzos para restaurar pastizales han demostrado que es importante que las semillas replantadas provengan de una amplia gama de hábitats.

Aitken y Michael C. Whitlock, genetista de poblaciones de la Universidad de la Columbia Británica, acuñaron el término «flujo genético asistido» en un documento de 2013. Durante la última década, los científicos y los conservacionistas han estado debatiendo sobre una idea más ambiciosa, la migración asistida, que se refiere a trasladar especies a grandes distancias, fuera de sus áreas de distribución naturales. Pero el flujo genético asistido dentro del área de una especie corresponde a un enfoque más mesurado y cuenta con una base genética rigurosa. Para cuando AdapTree concluya dentro de unos años, se habrá reunido información sobre la secuencia de ADN de 12.000 pinos (*P. contorta*) y piceas de más de 250 poblaciones de toda la Columbia Británica y Alberta.

ZONAS CLIMÁTICAS

Esos árboles ya están notando los efectos del cambio climático. En los años setenta, el Gobierno de la Columbia Británica publicó un mapa de la provincia en el que se distinguían una serie de zonas biogeoclimáticas. Ese mapa ha sustentado la planificación forestal en el oeste de Canadá durante cuatro décadas y, en concreto, ha ayudado a decidir qué semillas pueden ser plantadas y dónde. Pero hoy, debido al cambio climático, casi una cuarta parte del mapa se ha vuelto obsoleto. Algunas zonas se han movido y otras se han contraído drásticamente. Varias regiones de elevada altitud y algunas mesetas interiores ya han perdido alrededor de la mitad de su hábitat y podrían reducirse en más de un 80 por ciento en 2100. Las semillas de árboles que una vez prosperaron en un área en particular tal vez hoy ni siquiera puedan crecer allí. Los ecosistemas podrían transformarse en otros fundamentalmente diferentes, aunque la cuestión sobre cuánto cambio se requiere para que un ecosistema se considere «fundamentalmente diferente» no está clara y desata controversia.

Hasta qué punto una población particular puede adaptarse al cambio depende en parte de la rapidez con que se multiplican los organismos. Cada nueva generación representa la oportunidad de adquirir nuevas características útiles. Así, un escarabajo del pino, que se reproduce en poco tiempo, tiene más posibilidades de adaptarse que un árbol, que es longevo y tarda en reproducirse. Un solo escarabajo quizá no asista a ningún cambio durante su vida. Un árbol, en cambio, tiene muchas probabilidades de experimentar el calentamiento global.

Un bosque está sometido a un mayor riesgo durante sus primeros veinte años de vida. Una vez establecidos, los árboles se vuelven mucho más resistentes y tienen la capacidad de permanecer durante algún tiempo, comenta Brad St. Clair, genetista del Servicio Forestal de Estados Unidos en Corvallis, Oregón. Pero en la era del calentamiento global, las condiciones locales pueden cambiar notablemente durante esas dos décadas cruciales.

«Si se desplaza un organismo a una mayor altitud para que esté adaptado a un clima futuro, entonces tiene que poder resistir el frío de hoy», apunta St. Clair. En otras palabras, si en la actualidad se trasladan árboles tolerantes al calor a una zona donde se prevé un calentamiento en el futuro, estos podrían sufrir a corto plazo, porque la zona sigue siendo fría hoy en día.

«Tenemos un blanco en movimiento», reconoce Aitken. «¿Queremos optimizar los árboles con el clima cuando son plantones? ¿O cuando cuentan diez años? ¿O quizá treinta?» Una forma de hacer frente al riesgo consiste en incrementar la diversidad, lo que puede significar mezclar semillas locales y no locales. «No puede actuarse del mismo modo en cada hectárea

de terreno. Ni tampoco planificar pensando en un único escenario de cambio climático.»

El flujo genético asistido puede representar una buena manera de hacer crecer la diversidad genética de un bosque, al salpicar su acervo génico con los ingredientes que dan un impulso a los árboles. A medida que cambia el entorno, algunos árboles quizá sufran a corto plazo, pero otros tendrán el material genético que podría ayudarlos a soportar tiempos difíciles. «Cuando los individuos que están más en forma se reproduzcan más», dice Aitken, «esperamos que las poblaciones empiecen otra vez a extenderse». La cuestión fundamental consiste en mantener suficientes árboles sanos para que se crucen con otros y sobrevivan mientras el proceso de adaptación continúa.

Aitken espera que su trabajo ayude a establecer una nueva política forestal más inteligente. Opina que si no empezamos a aplicar el flujo genético asistido, las poblaciones de árboles comenzarán a debilitarse en los límites más al norte o al sur de las áreas de distribución de las especies. «Los árboles tal vez persistan durante mucho tiempo, pero quizá dejen de reproducirse», comenta. Lo que es peor, agotarían el espacio y la luz solar que necesitan desesperadamente las plántulas. Hacia el centro del área de distribución, la situación podría resultar algo menos dramática. Pero incluso allí los árboles podrían crecer más despacio o tener dificultades para sobrevivir. «¿Significa ello que las poblaciones de esas zonas vayan a perecer?», se pregunta Aitken. «Probablemente no. Existe una enorme variabilidad dentro de las poblaciones. Las especies no van a extinguirse, pero me imagino que en el ínterin tendríamos bosques con un estado de salud muy deteriorado.» La mala salud de los árboles perjudicaría a otras plantas y animales porque constituyen el pilar de ecosistemas enteros; además de proporcionar alimento y refugio, regulan el flujo de agua y mitigan la erosión del suelo.

Según Aitken, en todo el mundo se ha prestado muy poca atención al desplazamiento de individuos dentro de las áreas de distribución de las especies. Pero los riesgos ecológicos que esa práctica conlleva son inferiores a la introducción de árboles no nativos, porque estos no forman parte del ecosistema, a pesar de que posean algunos rasgos deseables.

Aun así, la estrategia del flujo genético plantea algunos riesgos. Podrían infiltrarse variantes de genes locales que redujeran la supervivencia de una población mayor. «Existe el peligro de introducir alelos no deseados», apunta Andrew Weeks, genetista de la Universidad de Melbourne. No obstante, el problema podría corregirse solo, añade. «Esa es la ventaja de la selección natural, que eliminaría tales variantes. Al incrementar el acervo génico, se está ofreciendo a la población una mejor oportunidad para el futuro.»

Teniendo en cuenta que los bosques de la Columbia Británica se valoran en 10.000 millones de dólares anuales, sin olvidar los servicios ecológicos que proveen (como mitigar las inundaciones y la erosión del suelo), no hacer nada puede suponer un riesgo aún mayor. En la Columbia Británica ya se ha experimentado de primera mano lo que el calentamiento global puede hacer con los bosques. Desde mediados de los años noventa, las invasiones de escarabajos y los incendios forestales, ambos vinculados a temperaturas más cálidas, han devastado millones de hectáreas de bosque y destruido cientos de hogares. «Hemos tenido numerosos avisos del cambio climático», comenta Greg O'Neill, científico del Ministerio de Bosques, Tierras y Recursos Naturales de la Columbia Británica. Los insectos y los incendios, añade, han hecho que la gente se dé cuenta de que no se trata de algo abstracto del futuro, sino que ya está sucediendo ahora.

Las pérdidas empujaron al Gobierno provincial a tomar medidas. En 2009 comenzó a revisar sus normas sobre traslado de semillas. Ese mismo año, O'Neill puso en marcha un ensayo de migración asistida en la provincia con la esperanza de determinar dónde y cómo los gestores forestales podrían plantar especies diferentes después de la tala. En 48 lugares de Canadá y el oeste de los Estados Unidos, los investigadores plantaron 15 especies de árboles de importancia comercial que desplazaron de su área de distribución y, en algunos casos, reubicaron a miles de millas de distancia.

Según O'Neill, la migración extrema no es más que una herramienta de investigación, una manera de obtener una mejor visión de conjunto sobre cómo responderán los árboles. No pretende ser una guía para realizar desplazamientos a larga distancia. En la práctica, cualquier cambio que se introduzca en las pautas de plantación será gradual. Algo así como recomendar no desplazar los árboles cuesta abajo o hacia el sur, comenta. Hay una estación meteorológica en cada sitio, y el estudio mos-





SEMILLAS DE CAMBIO: En el experimento AdapTree se recopilan semillas de diferentes hábitats (*1*). Los plantones de pino que crecen en el invernadero del proyecto (*2*) muestran variaciones en la forma (*3*). Algunas acículas son analizadas con una sonda (*varilla negra*) para ver si resisten temperaturas de congelación (*4*).

CORTESÍA DE JACK WOODS (*semillas*) Y DE CONNOR FITZPATRICK (*invernadero*), PROYECTO ADAPTREE, UNIVERSIDAD DE LA COLUMBIA BRITÁNICA

trará si el crecimiento y la supervivencia de las plántulas se relacionan con las condiciones locales. Entonces, los científicos podrán predecir el modo en que responderán los árboles al cambio climático, explica O'Neill.

El análisis genético de AdapTree ofrece otra manera de averiguar cómo se comportarán los árboles. Los investigadores determinaron las secuencias de ADN de millones de sitios del genoma de piceas y pinos del interior. Desarrollaron un método de muestreo rápido que examina unas 50.000 cadenas cortas, conocidas como polimorfismos de un único nucleótido. Ahora están intentando identificar los polimorfismos concretos que relacionan a un árbol con su lugar de origen. En el análisis inicial de 600 árboles jóvenes del proyecto AdapTree, hallaron marcadores genéticos que explicaban muchas de las diferencias que presentan los árboles de diversas regiones en cuanto al crecimiento y al modo en que lidian con el frío, el calor y la disponibilidad variable de agua.

3

4



CORTESÍA DE JACK WOODS (*plantones*) Y DE PIA SMETS (*viales*), PROYECTO ADAPTREE, UNIVERSIDAD DE LA COLUMBIA BRITÁNICA

El volumen de datos genéticos en bruto de AdapTree causa mareo. Si se imprimieran hojas de papel DIN A4 por las dos caras, la pila se elevaría unos 150 kilómetros. Y eso es solo parte de la información. Los investigadores estudian ahora cómo funcionan los genes en el mundo real, esto es, cómo se llevan a cabo sus instrucciones cuando los árboles se enfrentan a situaciones de estrés como la sequía o las altas temperaturas.

BOSQUES DEL FUTURO

Algunos grados de latitud hacia el sur, especialistas del servicio forestal de Estados Unidos empiezan a sopesar los pros y los contras del flujo genético asistido. «Conocer en qué punto nos hallamos conlleva largas conversaciones y debates», observa St. Clair. Tradicionalmente, los gestores forestales del país no tenían en cuenta las variaciones climáticas dentro de las zonas donde se recogían y sembraban las semillas. Desplazarlas dentro de una zona no parecía conllevar un cambio suficiente en la temperatura como para afectar a la salud de las plantas.

Ahora los forestales admiten que necesitan controlar mejor el movimiento de las semillas. Desde que se vienen plantando árboles, se han estado trasladando semillas a través de ríos, pueblos, continentes u océanos. «Si nos remontamos el tiempo suficiente, vemos que se han llevado simientes de un lado a otro desde siempre; y las plantaciones a menudo fracasaban porque la gente no sabía qué se traía entre manos», explica Glenn Howe, genetista forestal de la Universidad estatal de Oregón. En parte debido a esos fracasos, la comunidad forestal desarrolló con el tiempo una aversión al riesgo. En el oeste de EE.UU., las zonas de semillas, que determinan hasta dónde pueden desplazarse estas para ser sembradas, son estrechas y conservadoras. «Tal modo de actuar quizá sea apropiado en un clima estático», comenta Howe. «Pero, con el cambio climático, mantener un enfoque muy conservador podría resultar perjudicial.»

En la Columbia Británica se siguen haciendo progresos, pero todavía hay obstáculos por salvar. Más allá de los retos científicos existen problemas de gestión. El centro de semillas de árboles del Gobierno provincial alberga suficientes simientes para producir más de seis mil millones de árboles; no se puede cambiar ese repositorio de la noche a la mañana. Tampoco se puede modificar el comportamiento humano: los investigadores tendrán que convencer a los gestores de que confíen en los datos genómicos, algo que no pueden ver por sí mismos en el campo. Resulta fundamental que todos esos datos sobre polimorfismos de nucleótidos y secuencias genéticas se traduzcan al léxico de un forestal, apunta Aitken.

Porque, en definitiva, todas aquellas hebras de ADN conforman árboles que viven y respiran. Y de ellos dependemos para construir nuestros entornos antrópicos y también los naturales. Para prosperar en un mundo cambiante, algunos de esos árboles necesitarán explorar un nuevo territorio. Y, para lograrlo, van a precisar de nuestra ayuda.

PARA SABER MÁS

Placing forestry in the assisted migration debate. John H. Pedlar et al. en *BioScience*, vol. 62, n.º 9, págs. 835-842, septiembre de 2012.

Assisted gene flow to facilitate local adaptation to climate change. Sally N. Aitken y Michael C. Whitlock en *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, vol. 44, págs. 367-388, noviembre de 2013.

Evaluation of demographic history and neutral parameterization on the performance of FST outlier tests. Katie E. Lotterhos y Michael C. Whitlock en *Molecular Ecology*, vol. 23, n.º 9, págs. 2178-2192, mayo de 2014.

Proyecto AdapTree: **adaptree.forestry.ubc.ca**

EN NUESTRO ARCHIVO

Cambio climático, un experimento controlado. Stan D. Wullschleger y Maya Strahl en *IyC*, mayo de 2010.

El bosque mediterráneo ante el cambio global. Enrique Doblas en *IyC*, abril de 2013.

por Marc Boada

Marc Boada Ferrer es divulgador científico y experto en ciencia experimental.



Geomorfología experimental

Arena, agua y tesón son casi los únicos materiales necesarios para modelizar a escala de laboratorio la formación de relieves y del paisaje geológico

Tras los rigores del verano, el otoño nos ha regalado las tan ansiadas lluvias. Pero no es oro todo lo que reluce. Las precipitaciones entrañan también un gran riesgo, al menos en los países en los que estas pueden adquirir un carácter torrencial. Este es nuestro caso. La península ibérica sufre con más frecuencia de lo deseado precipitaciones intensísimas; en breves episodios, pueden llegar a acumularse decenas, incluso centenares, de litros por metro cuadrado [*véase* «Lluvias torrenciales», por Clemente Ramis et al.; Investigación y Ciencia, mayo de 2001]. Pese a su interferencia con los intereses humanos, estos fenómenos metereológicos son producto del quehacer natural de la atmósfera y parte fundamental del modelado geológico.

Aparte de las fuerzas tectónicas, son el viento, el hielo y el agua quienes se encargan de erosionar, transportar y sedimentar los materiales arrancados de los relieves por los lentísimos, pero dinámicos, procesos de meteorización. Decimos que son «lentos», pero lo que ocurre en realidad es que nuestras observaciones son inevitablemente breves. Además de la escala de tiempo, otro problema acecha al estudioso de lo geológico: las dimensiones físicas. ¿Cómo reproducir en el laboratorio el funcionamiento de un inmenso curso de agua? Recordemos que un río caudaloso puede extenderse centenares de kilómetros y que el curso de muchos torrentes litorales, por cortos que sean, llega fácilmente a varios miles de metros. La suma de todos estos factores hace que la experimentación geomorfológica en el laboratorio sea casi desconocida. Pero no imposible.

Para demostrarlo, traemos a estas páginas un modelo de una cuenca hídrica que nos permitirá ensayar muchos de los principales fenómenos relacionados con el modelado fluvial y la formación de relieves y estructuras sedimentarias. En realidad, se trata de un montaje ya clásico y de lo más sencillo: una caja (o un espacio acotado) donde situamos gravas y arenas, y sobre las cuales aportamos agua en cantidad suficiente como para establecer una circulación superficial y forzar así el transporte de material erosionado hasta un lugar con menor energía, donde este sedimentará.

Discutamos, para empezar, sobre el tamaño del modelo. La única posibilidad que tenemos de minimizar el problema de las dimensiones es trabajar, por una vez, a lo grande. Cuán grande construyamos el tanque dependerá de nuestras posibilidades. Si disponemos de un espacio cerrado (aula, laboratorio o garaje), pergeñar una cubeta de un metro y medio de

Pistola de riego
Entrada de agua
Agua
Aspersor
Agua
Aliviadero
Entrada de agua en sección
Agua
Aliviadero en sección
Sifón autocebante
Nivel máximo
Nivel mínimo
Lámina EPDM
Tapón de vaciado

TODAS LAS IMÁGENES SON DE MARC BOADA FERRER

longitud y otro de anchura, con palmo y medio de profundidad, puede ser óptimo y espectacular. Si, en cambio, podemos contar con un espacio abierto (el patio de la escuela, un terreno o un jardín), resulta mucho más práctico alzar un receptáculo realmente mayúsculo.

En mi caso, y después de prolijas pruebas y ensayos, escogí unas medidas de siete metros de largo por dos y medio de ancho. Ello me permitía trabajar en un primer objetivo: reproducir a escala 1:1000 algunos de los torrentes próximos a mi laboratorio, con recorridos típicos, desde la cabecera hasta que vierten sus aguas al mar, de entre cinco y diez kilómetros. Otra ventaja es que, en montajes de este tamaño, las fuerzas de tensión superficial del agua son totalmente despreciables, lo que nos permite ser menos exigentes en cuanto a la granulometría de los áridos que utilizamos.

Si se trabaja en el exterior, recomiendo situar la cubeta sobre algún desnivel del terreno ya existente. Así nos ahorramos una buena parte de los sedimentos con los que modelaremos el relieve. En el modelo experimental que mostramos, este relieve «de base» se aproximaba a los cincuenta centímetros, que, a la escala escogida (1:1000), equivalen a quinientos metros, altura típica de las sierras que recorren el litoral mediterráneo.

Volvamos a la cubeta. Muchos son los materiales óptimos para su construcción. En modelos pequeños, el metacrilato transparente permite observar todo lo que ocurre en el interior. Pero cuando la instalación es al aire libre y de tamaño notable, es más práctico utilizar madera. Sin dificultad encontraremos tableros resistentes a la humedad —aunque son algo caros—. Buscando más, hallaremos también tablones de madera de castaño, de durabilidad contrastada. Para aquellos que quieran algo casi eterno y barato, recomendamos la obra de albañilería. Y los más pragmáticos pueden recurrir al uso de troncos o piedras o, incluso, a la excavación de la cubeta en el suelo.

Después de construir la cubeta, deberemos impermeabilizar su base. Un simple plástico, toldo o hule servirá cabalmente. Pero si nos proponemos experimentar durante largo tiempo, recomiendo vivamente la visita a un almacén de material de construcción, donde encontraremos lámina de caucho EPDM (etileno propileno dieno de clase M), que resistirá como ningún otro material la abrasión y las inclemencias del tiempo. La lámina, sea del



material que fuere, la fijaremos sobre los laterales de la cubeta, de forma que en su parte baja pueda embalsar un buen volumen de agua (unos mil litros en nuestro ejemplo) para poder simular el mar.

Para mantener constante la altura del mar, realizaremos un rebaje en algún punto del nivel inundable, constituyendo así un aliviadero. El agua que escape por este, la canalizaremos hacia algún lugar adecuado o un recipiente donde situar una bomba de agua de recirculación.

A estas alturas ya solo quedan algunos detalles. El primero y más importante es el árido que utilizaremos para crear el relieve que con posterioridad vamos a erosionar. Interesa localizar cantidades ingentes de materiales variados en granulometría, peso específico y color. En el modelo que mostramos hemos empleado arena procedente de aluviones naturales. Primero se tamizó mediante una malla de 25 milímetros de luz (todo lo que no pasó por esta fue descartado). La fracción restante se pasó luego por otra malla de 10 milímetros. La fracción gruesa así separada, de entre 25 y 10 milímetros, se utilizó para formar una capa base sobre la goma de EPDM. Con el resto se modelaron montañas y valles, intercalando estratos de arena de playa y de granito meteorizado. El peso total de todo ello superó de largo las dos toneladas. (Si optamos por un modelo de menor tamaño, será mejor que usemos materiales más finos; de lo contrario, los procesos erosivos ocurrirán a gran velocidad y no tendremos tiempo de fijarnos en los detalles.)

Exhaustos, llegamos al gran factor energético de nuestro modelo: el agua. Es fundamental disponer de un caudal abundante y varias opciones para su aportación. Una manguera con una buena pistola de riego hará llegar la lluvia sobre determinadas zonas. Un aspersor del huerto nos permitirá simular una pertinaz precipitación sobre áreas extensas. Y si a todo ello sumamos un manantial de montaña en forma de tubo enterrado a media altura del relieve, la erosión está garantizada.

Hagamos una primera prueba. Llenemos de agua el espacio más bajo hasta formar un mar. Tomemos la pistola de riego y seleccionemos una boquilla que proporcione un fino abanico de agua. Reguemos las montañas ❶. Por poco que insistamos en un punto concreto, se producirá una movilización súbita del material ❷. Acabamos de reproducir un corrimiento en masa, el fenómeno responsable de grandes movimientos en laderas y de la formación de flujos catastróficos.

En cambio, si distribuimos las precipitaciones en una zona amplia se formarán barrancos que erosionarán rápidamente sus propias vertientes, encajonándose y forzando desprendimientos de las laderas incluso donde no llueve. Podremos observar cómo las grietas incipientes se transforman en movimientos rotacionales, dejando cicatrices en la ladera con una típica forma de media luna. En cualquier caso, llegará un enorme volumen de sedimento al flujo de agua; a veces es tanto, que temporalmente obtura la circulación, creándose un dique inestable que acaba por romper. Resultado: al transcurrir los minutos, aparecen relieves muy marcados, propios de ambientes subdesérticos con climatología tempestuosa ❸.

Sigamos el agua en su curso descendente. Más abajo, las aguas torrenciales llegan a zonas con menor pendiente; incapaces de transportar los materiales, formarán un cono de deyección. Observemos esta estructura sedimentaria con atención: es la responsable de muchos de los paisajes que vemos al pie de grandes relieves. Si persistimos en el riego, a través de estos

conos se formarán uno o varios canales que, de nuevo, movilizarán sedimentos. Si la corriente es continua, poco a poco avanzará hacia cotas más bajas formando un pequeño riachuelo que abandonará las partículas mayores. Se habrá establecido un abanico aluvial ❹.

A los jóvenes les fascina observar que el agua siempre acaba encontrando los puntos más bajos. Pero al geólogo experimental no le extraña en absoluto: sabe que la gravedad está continuamente allí, constituyendo una dirección privilegiada a la que nada se substrae. Pese a ello, en algunos puntos es mínima, casi nula. En efecto, si la pendiente se hace demasiado pequeña para el régimen torrencial (en el cual domina la gravedad y la energía cinética), sucede el régimen fluvial [*véase* «¿Río o torrente?», por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik; Investigación y Ciencia, agosto de 2010]. Ello se manifiesta en la estructura del río que hemos fabricado. Bajo pendientes muy suaves, el curso tiende a formar meandros. En cambio, si la pendiente es algo más pronunciada, el canal central por donde circula el agua se ramifica en múltiples flujos paralelos; hablaremos entonces de un río entrelazado ❺.









Si alargamos la experimentación durante algunas horas o, de forma intermitente, durante días, la estructura geológica se enriquece. La selección por tamaño de las distintas partículas aumenta. El relieve artificial con el que habíamos empezado gana en «naturalidad», imitando con buen detalle lo que observamos en valles y montañas reales.

Al final, y sean cuales sean las circunstancias por las que haya pasado, nuestro diminuto río desemboca al mar, junto con los sedimentos arrancados a las montañas. Allí, las partículas mantenidas en suspensión por el rápido movimiento del agua y las piedrecillas que han ido reptando por su lecho experimentarán un rápido frenado, sedimentando de inmediato: las gruesas primero; las más finas, después. A escala macroscópica, ello se visualiza en forma del avance de la línea de playa y de la aparición de una estructura deltaica que crece bajo el agua hasta emerger de forma progresiva. Si el caudal fluctúa cíclicamente, la estructura interna del delta estará estratificada. Merece la pena realizar una sección geológica.

Para ello procederemos a vaciar el mar. Una vez casi seco, realizaremos un corte. Con paciencia y una espátula, eliminaremos parte del sedimento, tallando un plano perfectamente liso y vertical justo en la desembocadura. Las orientaciones posibles son dos: perpendicular al canal del río o transversal a este. En ambos casos, observaremos capas alternantes de materiales finos y gruesos que se intercalan de forma característica.

Ante nosotros tenemos las principales leyes de la estratigrafía: cada estrato corresponde a un episodio de sedimentación, en este caso asociado a un evento climático (lluvia). Por tanto, a esta escala, toda su extensión tiene la misma antigüedad. También será evidente que el estrato superior es siempre más moderno que el inferior. Si, además, conseguimos que el nivel del mar fluctúe, imitando los grandes cambios eustáticos que ocurren de forma natural, podremos observar una fidelísima reproducción de la estratigrafía deltaica (entonces ya no estaremos trabajando a escala 1:1000; nos habremos ido dos órdenes de magnitud por encima, es decir, a 1:100.000).

En el modelo aquí presentado, el movimiento mareal se realiza con un sifón autocebante. Se trata de un tubo en forma de «U» invertida que, al quedar totalmente sumergido en la zona marina, aspira agua en cantidad suficiente como para desalojar el aire de su interior e iniciar un rápido vaciado por efecto sifón. Lógicamente, el vaciado cesa cuando el nivel desciende por debajo de la boca de entrada. A partir de ese momento, el nivel asciende, alimentado por las lluvias o por una fuente accesoria de agua, hasta cebarse de nuevo y repetir el proceso automáticamente.

Incluso para aquellos interesados en la sedimentación litoral, resulta fácil imitar las corrientes costeras que modelan las formas deltaicas. Solo debemos aportar un buen flujo de agua directamente al mar, en paralelo a la línea costera y en el punto opuesto al aliviadero. Como resultado, los sedimentos más finos serán arrastrados lejos de la desembocadura, formando estructuras sedimentarias con refinado detalle.

A esta primera prueba exploratoria pueden seguirle muchas otras de más precisión o amplitud de estudio. Una pared situada en el curso del río emulará perfectamente un pantano. Observaremos así la función de las presas de laminación, encargadas de frenar el ímpetu de las avenidas. Eso sí, será de vida efímera, ya que terminará colmatada de sedimentos. Unos pequeños tacos de madera simularán una ciudad, que podemos fundar al lado de meandros, canales o sobre conos de deyección intermitentes. Incluso pueden disponerse sobre el río diminutos puentes para observar el comportamiento de las obras humanas ante las fuerzas de la naturaleza. En resumen, la fenomenología geomorfológica pasará ante nuestros ojos a velocidad acelerada.

por Alejandro Pérez Carballo

Alejandro Pérez Carballo es profesor de filosofía en la Universidad de Massachusetts en Amherst.



¿Está cerca el final de la humanidad?

Por qué deberíamos creer que la gran mayoría de los seres humanos ha nacido ya

Antes o después la especie humana se extinguirá. ¿Cuándo llegará nuestro fin? Parece imposible aventurar una respuesta a una pregunta semejante sin considerar algún tipo de modelo sobre nuestro futuro: uno que tenga que ver con la superpoblación, con el fin de los recursos del planeta o con la muerte del Sol, pongamos por caso. Sin embargo, varios investigadores han llegado a la sorprendente conclusión de que la cuestión puede abordarse sin más herramientas que la teoría de la probabilidad y un poco de lógica.

Reformulemos nuestra pregunta en términos algo más concretos. Llamemos M al conjunto de todas las personas que habrán existido una vez que la humanidad llegue a su fin, y m al conjunto de seres humanos nacidos antes que usted. ¿Qué podemos decir acerca de la relación entre M y m? En otras palabras: ¿qué proporción de todos los seres humanos pasados, presentes y futuros han nacido antes que usted?

Los pesimistas dirán que la mayor parte de los miembros de nuestra especie han nacido ya; es decir, que pertenecen al conjunto m. Un pesimista podría pensar, por ejemplo, que m representa el 95 por ciento de M. Los optimistas, en cambio, creerán que la mayoría de los seres humanos está aún por llegar al mundo; por ejemplo, que m apenas supone el 5 por ciento de M.

¿A quién creer? Como veremos, existe un argumento según el cual deberíamos decantarnos por la opción pesimista. Para entenderlo, demos antes un pequeño rodeo.

Creencias actualizadas

En mi última columna consideré una interesante aplicación de la teoría de la probabilidad: el uso de funciones de probabilidad para cuantificar nuestros niveles de creencia [*véase* «El problema de la bella durmiente», por Alejandro Pérez Carballo; Investigación y Ciencia, octubre de 2015]. Si bien todos nosotros creemos en muchas cosas, no cabe duda de que estamos más seguros de unas («mañana saldrá el sol») que de otras («mañana lloverá»). Por tanto, parece tener sentido hablar de nuestro nivel de creencia en una hipótesis dada. Al afirmar que una función de probabilidad P coincide con nuestra función de creencia, estamos diciendo que el número que la función P le asigna a una hipótesis determinada se corresponde con nuestro nivel de creencia en dicha hipótesis.

Supongamos que le entregan una caja y le garantizan que, o bien contiene 95 bolas rojas y 5 amarillas, o bien contiene 5 bolas rojas y 95 amarillas. Llamemos H_{95} a la primera hipótesis (en la caja hay 95 bolas rojas) y H_5 a la segunda. También le han asegurado que la caja ha sido elegida mediante un lanzamiento de moneda. Así pues, en un primer momento usted asignará el mismo nivel de creencia a ambas hipótesis: $P(H_{95}) = P(H_5) = 0{,}5$.

Ahora imagine que extrae una bola al azar y que esta es roja. ¿Debería actualizar sus niveles de creencia una vez que dispone de esta información?

La teoría de la probabilidad nos ofrece una respuesta. Al aprender que un evento E ha tenido lugar, nuestro nivel inicial de creencia en la hipótesis H, $P(H)$, deberá cambiar a $P(H|E)$, la probabilidad de H dado E. Y el nuevo nivel de creencia deberá ser mayor que el inicial siempre que E sea más probable bajo el supuesto de que H es verdadero que bajo el supuesto de que $\neg H$ (el opuesto de H) es verdadero. Ello se debe a que:

$$P(H|E) > P(H) \Leftrightarrow P(E|H) > P(E|\neg H) .$$

Este resultado —bastante intuitivo, por otra parte— puede demostrarse con facilidad a partir del teorema de Bayes.

Volvamos a nuestra caja. A partir de la relación anterior, podemos concluir que, una vez que extraiga una bola y vea que es roja, su nivel de creencia en H_{95} deberá ser mayor que su nivel de creencia en H_5. Ello se debe a que la probabilidad de obtener una bola roja bajo el supuesto de que H_{95} es verdadero, $P(R|H_{95})$, es mayor que la de obtener una bola roja bajo el supuesto de que H_{95} es falso, $P(R|\neg H_{95})$.

Recordemos que en el juego solo hay dos cajas posibles, por lo que H_{95} es falso si y solo si H_5 es verdadero. Así pues:

$$P(R|\neg H_{95}) = P(R|H_5) = 0{,}05 .$$

Y, por otro lado:

$$P(R|H_{95}) = 0{,}95 .$$

Es decir, $P(R|H_{95}) > P(R|\neg H_{95})$ y, en consecuencia, $P(H_{95}|R) > P(H_{95})$. Su nivel de creencia en H_{95} tras sacar una bola roja deberá aumentar con respecto a su nivel de creencia inicial. Dado que en un principio habíamos asignado probabilidades idénticas a H_{95} y H_5, una vez extraigamos una bola y esta resulte ser roja, deberíamos estar más seguros de que nos encontramos ante la caja con 95 bolas rojas que ante la que solo contiene 5 de ellas.

Una lotería curiosa

A continuación le invitan a participar en otro juego. Detrás de una puerta se encuentra uno de dos hermanos gemelos sentado en un escritorio. Uno de ellos, Fermín, tiene una caja con 10 billetes numerados del 1 al 10. El otro, Guillermo, dispone de una caja que contiene 100 billetes numerados del 1 al 100.

Le dicen que, al abrir la puerta, el hermano que se halle en el escritorio le entregará uno de los boletos que tiene a su disposición. El número dependerá de cuántas personas hayan entrado en la sala antes que usted: si usted es la n-ésima persona que abre la puerta, recibirá el billete con el número n. Una vez que vea el boleto, su objetivo consistirá en adivinar si el caballero sentado en el escritorio era Fermín o Guillermo.

Al entrar ve a un hombre de ojos tristes y bigote blanco que, sin mediar palabra, le entrega un pedazo de papel y procede a ignorarle como si nunca hubiera estado allí. Usted abre el boleto y comprueba

que se trata del número 7. ¿Quién se lo entregó, Fermín o Guillermo?

Llamemos F y G a las hipótesis de que se tratase de Fermín o de Guillermo, respectivamente, y n_7 al evento correspondiente a haber obtenido el número 7. Imaginemos que, antes de abrir la puerta, usted asignaba el mismo nivel de creencia a F y a G: $P(F) = P(G) = 0{,}5$. Al recibir el número 7, ¿cómo deberían cambiar sus niveles de creencia?

Parece razonable suponer que la probabilidad de obtener un número cualquiera debería ser igual a $1/N$, donde N es la cantidad total de billetes a disposición del hombre del escritorio. Por tanto, $P(n_7|F)=1/10$ y $P(n_7|\neg F) = P(n_7|G) = 1/100$.

Así pues, usando el mismo argumento que en el apartado anterior, podemos concluir que, al recibir el número 7, su nivel de creencia en F habrá de aumentar. Si tuviese que adivinar quién estaba sentado en el escritorio, lo más sensato sería apostar por Fermín.

El final de la humanidad

Ya estamos en condiciones de abordar el problema que planteábamos al principio de la columna. Para manejar cifras concretas, supongamos que el número de seres humanos que han nacido antes que usted asciende a 57.000 millones de personas; es decir, $m = 57 \cdot 10^9$. (Las estimaciones que manejan los expertos sobre el número de personas nacidas hasta ahora en el mundo arrojan un orden de magnitud similar.) Ahora consideremos dos posibilidades.

Según la hipótesis pesimista, H_p, la especie humana desaparecerá pronto. Los nacidos antes que usted dan cuenta del 95 por ciento de todos los seres humanos habidos y por haber, por lo que la humanidad se extinguirá cuando la población acumulada a lo largo de la historia llegue a 60.000 millones: $M_p = 60 \cdot 10^9$.

Por su parte, la hipótesis optimista, H_o, defiende que nuestra especie se encuentra aún en su infancia. Tal vez logremos colonizar otros planetas, por lo que podemos suponer que antes que usted solo han nacido el 5 por ciento de todas las personas pasadas, presentes y futuras. Traducido a números, H_o plantea que la cifra total de seres humanos que han existido o existirán algún día asciende a 1,14 billones de personas: $M_o = 1{,}14 \cdot 10^{12}$.

Por el momento, usted ignora cuántas personas han nacido hasta ahora. Solo conoce las cifras totales de población que manejan los pesimistas y los optimistas: 60.000 millones y 1,14 billones, respectivamente. Supongamos que alguien le ha convencido —no importa cómo— de que una de esas dos hipótesis es cierta y que ambas son igual de probables: $P(H_p) = P(H_o) = 0{,}5$.

Ahora le informan de que en el mundo han nacido 57.000 millones de personas antes que usted. ¿Deberían cambiar por ello sus opiniones acerca del futuro de la humanidad?

Tras reflexionar un poco, se percata de que se encuentra en una situación muy similar a la del juego de los gemelos. Nacer es como abrir la puerta. Una vez «dentro», puede cerciorarse de cuántas personas le han precedido: conocer dicha cifra equivale a recibir el número $m = 57 \cdot 10^9$. Fermín y Guillermo son ahora el pesimista y el optimista, quienes tienen a su disposición $M_p = 60 \cdot 10^9$ y $M_o = 1{,}14 \cdot 10^{12}$ boletos.



ISTOCKPHOTO/ARTPUPPY

Al obtener el número $m = 57 \cdot 10^9$, sus niveles de creencia en H_p y H_o pasarán a ser, respectivamente, $P(H_p|m)$ y $P(H_o|m)$, donde aquí m representa la asignación del número en cuestión. Sabemos que su nivel de creencia en H_p aumentará si y solo si:

$$P(m|H_p) > P(m|\neg H_p) = P(m|H_o)$$

(recordemos que está convencido de que H_o es verdadero si y solo si H_p es falso). Pero, al igual que antes, parece claro que la probabilidad de obtener el número $m = 57 \cdot 10^9$ será mayor si se reparten $M_p = 60 \cdot 10^9$ billetes que si se entregan $M_o = 1{,}14 \cdot 10^{12}$. Por tanto, su nivel de creencia en H_p habrá de aumentar.

¿Cuánto debería hacerlo? Supongamos que, bajo la hipótesis H_p, la probabilidad de obtener el billete con el número i es $1/M_p$ si $i \le M_p$, y 0 si $i > M_p$. De igual modo, bajo la hipótesis H_o, la probabilidad de obtener el billete con el número j será igual a $1/M_o$ si $j \le M_o$, y 0 si $j > M_o$.

Según el teorema de Bayes, una probabilidad condicionada $P(A|B)$ cumple:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)\,P(A)}{P(B)}$$

Por tanto, si sus niveles de creencia iniciales en H_p y H_o satisfacían $P(H_p) = P(H_o)$, tendremos que:

$$\frac{P(H_p|m)}{P(H_o|m)} = \frac{P(m|H_p)\,P(H_p)}{P(m|H_o)\,P(H_o)} = \frac{P(m|H_p)}{P(m|H_o)} = \frac{1/M_p}{1/M_o} = \frac{1140}{57} = 20\,.$$

Es decir, solo por haber aprendido que antes que usted nacieron 57.000 millones de personas, su nivel de creencia en H_p debería aumentar hasta tornarse 20 veces mayor que su nivel de creencia en H_o. Si suponemos que su nivel total de creencia en una u otra hipótesis era y sigue siendo 1 (es decir, que está seguro de que al menos una de ellas es cierta), podemos deducir que su nivel de creencia en H_p ha pasado de 0,5 a 0,95. ¡Debería estar casi convencido de que la especie humana se extinguirá muy pronto!

Podemos obtener un resultado similar sin necesidad de suponer que sus niveles de creencia iniciales en H_p y H_o eran idénticos. Por ejemplo, si es usted una persona optimista que en un principio asignaba a la hipótesis H_p un nivel de creencia igual a 0,2, al recibir el «número» 57.000 millones debería elevar dicho nivel de creencia hasta poco más de 0,83. Solo si su nivel de creencia inicial en H_p era menor que 0,05 tendríamos que $P(H_p|m) < 0{,}5$. Y aun así, ¿no parece increíble que, solo por aprender que antes que usted nacieron 57.000 millones de personas, su nivel de creencia en que la humanidad se extinguirá pronto debería aumentar de un 5 a un 50 por ciento?

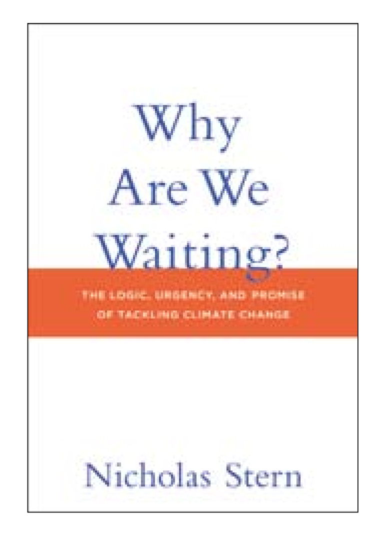
Lo mejor sería encontrar un error en el razonamiento que acabamos de presentar. En mi próxima columna analizaré algunas posibilidades.

PARA SABER MÁS

El problema que hemos expuesto aquí se conoce con el nombre de «argumento de fin del mundo». Uno de sus proponentes, el filósofo de la Universidad de Guelph John A. Leslie, elabora con detalle el razonamiento que hemos expuesto en la última sección en su libro **The end of the world: The science and ethics of human extinction** (Routledge, 1996).

EN NUESTRO ARCHIVO

Thomas Bayes y las sutilezas de la estadística. Marc Dressler en *IyC*, julio de 2013.



WHY ARE WE WAITING? THE LOGIC, URGENCY, AND PROMISE OF TACKLING CLIMATE CHANGE

Nicholas Stern. The MIT Press, Cambridge, Mass., 2015.

Cómo hacer frente al cambio climático

De la amenaza a la creación de oportunidades

La población mundial se enfrenta a retos formidables. Dos siglos de investigación científica, apoyados en la física básica de los efectos de los gases de invernadero y en pruebas poderosas, denuncian la amenaza de un cambio climático en el curso de los próximos cien años que transformará la relación entre el hombre y el medio. Centenares o miles de millones de personas habrán de emigrar. La historia enseña que esos traslados siempre comportan tensiones y conflictos. Somos la primera generación que, por negligencia, podría destruir el nexo entre humanos y planeta, y quizá la última que tenga en sus manos poder evitarlo.

Los gases de invernadero inhiben el flujo de energía. La actividad humana está causando que aumente y se acelere su concentración a medida que el planeta se vaya calentando más. Los riesgos del cambio climático son abrumadores. Los beneficios de una intervención para evitarlo parecen también claros, observado que el desarrollo económico, la reducción de las emisiones y la adaptación imaginativa van de la mano. Una decidida transición hacia una concentración de carbono baja podría propiciar una nueva ola de transformación económica y tecnológica, una nueva era de prosperidad global y sostenible. ¿A qué, pues, esperamos? Tal es la razón de ser de este libro, en el que Nicholas Stern explica por qué, pese a la sugestiva atracción de un nuevo rumbo, resulta tan difícil acometer con decisión el problema del cambio climático.

Stern, experto del Banco Mundial, enseña en la Escuela de Economía de Londres. Sus trabajos han servido de plantilla para las sucesivas Conferencias Internacionales dedicadas al clima. Tras la aparición de *The Stern review*, publicado en línea a finales de octubre de 2006 y en forma de libro en enero de 2007, el interés público en el cambio climático conoció altibajos; muchas naciones de primer rango se mostraron renuentes a cooperar. Proponía allí su tesis capital: los costes y riesgos de la inhibición superan de lejos los costes y riesgos de la intervención con medidas que amortigüen los efectos. Le siguió, en 2009, *A blueprint for a safer planet*, publicado ocho meses antes de la Conferencia Internacional sobre el Clima reunida en Copenhague. En 2010, las naciones se pusieron de acuerdo en limitar la subida de la temperatura del planeta hasta 2 grados más; en fecha más reciente han convenido en cómo realizarlo.

Se quiso, y se propuso, que *Why are we waiting*? sirviera de texto de referencia para la Conferencia que las Naciones Unidas celebra este mes en París, con vistas a alcanzar un acuerdo sobre las emisiones de gases de efecto invernadero. Recoge el estado de la cuestión. Sostiene que los riesgos y costes del cambio climático son peores que los estimados en *The Stern review*. Para conjurar la amenaza podemos apoyarnos en técnicas, métodos e instituciones del pasado o podemos introducir cambios, innovación y colaboración internacional. La primera opción podría traernos desarrollo a corto plazo, pero acabaría por llevarnos al caos, conflictos y destrucción. La segunda opción podría significar mejor vida para todos y un desarrollo sostenible a largo plazo, capaz de ganar la batalla contra la pobreza mundial. La ciencia nos advierte de los peligros de la dejadez; la técnica y la economía nos muestran lo que podemos hacer y los grandes beneficios que se seguirán.

Desde los años sesenta del siglo pasado, cada decenio ha supuesto un aumento de temperatura. Las emisiones de gases de efecto invernadero subieron a su nivel más elevado en julio de 2014, que fue, a su vez, el año más caliente registrado por la Administración Nacional Atmosférica y Oceánica de Estados Unidos. Las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono se elevaron en 1,9 partes por millón, hasta 307,2 partes por millón en promedio global en 2014, lo que suponía un 42 por ciento más de los niveles de la era preindustrial. La temperatura de la superficie marina alcanzó también cotas desconocidas; la subida del nivel del mar mantuvo la pauta de unos 3,2 milímetros de incremento anual, habitual en los dos últimos decenios. Las temperaturas de 2015 auspician otro año récord.

Aunque sube la temperatura, la variabilidad natural interna del clima, relacionada con el tiempo atmosférico, puede enmascarar el calentamiento global en un año determinado o incluso en una década, sobre todo a escala local. Los expertos discrepan en si hubo o no deceleración en la tasa de incremento de la temperatura superficial media global desde 1998 hasta 2013. La actividad humana incrementa la emisión de gases de efecto invernadero que atrapan el calor, sobre todo dióxido de carbono procedente de combustibles fósiles. Ese aumento producido eleva la temperatura atmosférica, pero los aerosoles atmosféricos, sobre todo los procedentes de combustibles fósiles, frenan dicho incremento.

A medida que el cambio climático avance, el calentamiento global repercutirá sobre las áreas metropolitanas con especial dureza, porque sus construcciones y pavimentos absorberán rápidamente luz solar y elevarán la temperatura local, un fenómeno conocido como «efecto isla térmica urbana». Como resultado, las ciudades podrían sufrir olas de calor letales. La ciencia de la adaptación al cambio climático debe contar con la experiencia de las poblaciones afectadas. Iniciativas o proyectos respaldados por la ciencia (pensemos en la «Modelización de la Agricultura Europea con el Cambio Climático para la Seguridad Alimentaria» o el «Proyecto de Refinamiento e Intercomparación de Modelos Agrícolas») se están desarrollando en estrecho contacto con expertos locales y comunidades agrarias. Tales programas constituyen una etapa

importante, más allá de las proyecciones académicas sobre el impacto del cambio climático en la producción alimentaria mundial.

El cambio del régimen de lluvias y pautas de temperatura causará inevitables tensiones para agricultores y ganaderos, si las olas de calor, sequías y tormentas extremas se tornan habituales, como es de esperar en muchos sitios. Del incremento local sirva de ejemplo California. Desde 2012, la región ha venido sufriendo su peor sequía en más de un siglo, con unas temperaturas que están poniendo en tensión bosques, peces y ecosistemas, además de resentirse la economía regional. Las pérdidas en el campo supusieron 2200 millones de dólares en 2014; hasta 12 millones de árboles han desaparecido, con impactos en cascada sobre anfibios, aves y mamíferos. Las intensas lluvias que causaron inundaciones devastadoras en la ciudad rusa de Krymsk en 2012 se han vinculado al calentamiento de la superficie del mar Negro. El diluvio causó casi 200 bajas. En una noche cayó el doble del mayor registro hasta entonces. De acuerdo con los modelos establecidos, la temperatura superficial del mar Negro produjo un incremento del 300 por ciento de la pluviosidad en comparación con los modelos de temperaturas similares de 1980. El calentamiento del agua desestabiliza la atmósfera propiciando la formación de temporales.

Las previsiones agrarias resultan particularmente difíciles porque han de enfrentarse a diferentes fuentes de incertidumbre: cómo será el cambio climático regional, qué supuestos deben considerarse a la hora de sembrar qué cosechas, con qué abonos se contará. En el agro austriaco, cuarenta años atrás, se esperaba a que el sol apretara, a finales de abril, para sembrar el maíz. Pero el clima ahora es más cálido y se adelanta la siembra dos semanas. Para la cosecha eso no es malo, porque significa que el maíz, que no acaba nunca de madurar en aquel clima, dispone de 15 días más para hacerlo. Martin Schönhart, de la Universidad de Viena, presentó unas previsiones provisionales sobre la producción agraria para el año 2040. Algunas cosechas y frutales se beneficiarían del calentamiento esperado; pero otras (maíz incluido) disminuirían en un 20 por ciento debido a las alteraciones en precipitación y episodios extremos del tiempo atmosférico que borrarían los potenciales beneficios traídos por el calentamiento. Juicio con el que muchos agricultores no están de acuerdo. Por eso se insta la colaboración entre el campo y la academia.

En un estudio de revisión general del año 2014, los problemas previsibles serían superiores a los beneficios que produjeran las cosechas de trigo y maíz en las regiones de latitud baja, donde están concentrados los países subdesarrollados. En otro estudio, también de 2014, que analizaba 1700 simulaciones proyectadas, se concluía que, si no se toman medidas de adaptación, las cosechas de trigo, maíz y arroz caerán en las regiones templadas y tropicales con un ascenso de temperatura de dos grados.

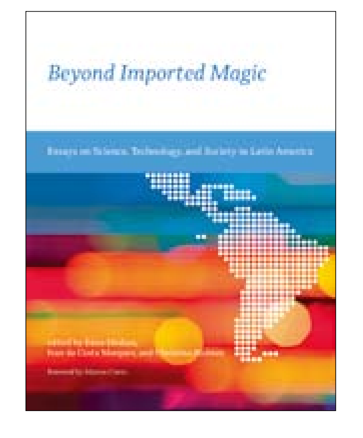
La producción mundial de maíz supera los mil millones de toneladas, la de arroz está en torno a los 750 millones, la de trigo se cifra en más de 700 millones y la de caña de azúcar en 2000 millones. Pese a ello, hay más de 800 millones de personas que mueren de hambre cada año. Aun cuando no cambiara el clima, la agricultura se enfrentará a una enorme presión conforme la población mundial pase de los 7000 a los 9000 millones de personas en 2050. Los arrozales producen entre el 7 y el 17 por ciento de las emisiones globales del gas metano, de efecto invernadero, una cifra condenada a aumentar conforme crezca la demanda del cereal. La investigación básica trabaja en la mejora de un arroz cuyas semillas y tallos producen más biomasa y almidón que el arroz normal, al tiempo que emiten menos metano y producen un menor nivel de metanógenos rizosféricos. La variedad se ha creado mediante la incorporación de un gen codificador del factor de transcripción de la cebada SUSIBA2.

En la historia de la humanidad no abundan los ejemplos de amenazas globales cuyo impacto real pusiera a las naciones en alerta. Pero ahora, con el cambio climático, nos encontramos ante una amenaza creciente contra los recursos alimentarios, la salud, los ecosistemas y los servicios. Se halla en entredicho la propia viabilidad de un planeta. Inquietud que ha llegado a todas las esferas públicas. Un juzgado de distrito de La Haya acaba de sentenciar que el Gobierno de la nación intensifique drásticamente su lucha contra el cambio climático. De acuerdo con el tribunal, para el año 2020, Holanda deberá recortar las emisiones de dióxido de carbono en un 25 por ciento de los niveles registrados en 1990. En el razonamiento se consideró el calentamiento global como la violación de uno de los derechos humanos. En otro plano, la Comisión Lancet sobre Salud y Cambio Climático del mes de junio de 2015 declaró que el cambio climático comporta graves riesgos para la salud.

Las ciudades producen más del 70 por ciento de las emisiones de CO_2 globales por consumo de combustibles fósiles; son el agente principal del cambio climático. Si las 50 ciudades más emisoras se unieran en un solo país, la nación emitiría un tercio de las emisiones, detrás de China y Estados Unidos. Algunas están tomando medidas para combatir el cambio climático. La ciudad de Los Ángeles, donde viven unos cuatro millones de personas, se ha propuesto reducir, de aquí hasta 2030, un 35 por ciento de las emisiones registradas en 1990. Allí, los vehículos rodados son responsables del 47 por ciento de las emisiones totales de dióxido de carbono; al consumo eléctrico corresponde un 32 por ciento. ¿Cómo piensa atajarlo? Se consideran las mejoras en cogestión del tráfico, calidad del aire, pasos peatonales y contaminación acústica.

Casi tres cuartas partes de las emisiones globales de carbono procedentes de la combustión de combustibles fósiles y producción de cemento entre 2010 y 2012 ocurrieron en China [*véase* «Una sorpresa con los gases de invernadero», por Mark Fischetti; Investigación y Ciencia, noviembre de 2015]. La Sociedad Europea de Física ha redactado un informe sobre los planes de la Unión Europea de alcanzar una producción sostenible de electricidad verde en el contexto de los retos de la energía global y del cambio climático. Destaca que la producción de electricidad sin combustible fósil recortaría las emisiones globales en un exiguo 3-4 por ciento. El Gobierno de Australia proyecta rebajar las emisiones de efecto invernadero entre un 26 y un 28 por ciento de los niveles de 2005 para el año 2030. Australia está a la cabeza de los países emisores de las 34 naciones industrializadas que componen la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico. Japón vuelve a la energía nuclear para reducir las emisiones de carbono y ayudar a frenar el calentamiento global. Barack Obama anunció en agosto de 2015 medidas para recortar la emisión de gases de invernadero de las centrales de energía. La normativa, elaborada por la Agencia Estadounidense de Protección del Medioambiente, propone una reducción del 32 por ciento de los niveles de 2005 para el año 2030.

—Luis Alonso



BEYOND IMPORTED MAGIC: ESSAYS ON SCIENCE, TECHNOLOGY, AND SOCIETY IN LATIN AMERICA

Dirigido por Eden Medina, Ivan da Costa Marques y Christina Holmes. MIT Press, Cambridge, 2014.

Más que magia importada

Una colección de ensayos sobre ciencia, tecnología y sociedad en Latinoamérica

Cuando se habla sobre ciencia y tecnología en Latinoamérica, es fácil caer en el estereotipo de países que importan su conocimiento de Europa y Estados Unidos. Este libro ofrece una rica colección de ensayos que expanden la visión sesgada de una sociedad incapaz de generar su propia ciencia y tecnología. En el volumen no se niega la relevancia de las ideas y productos que llegan del exterior. Sin embargo, se defiende de modo convincente que una descripción de la sociedad latinoamericana es insuficiente a menos que se consideren los procesos de generación y adaptación de ideas y conocimiento locales.

Por botón de muestra, se menciona la innovación mundial en Argentina del uso de huellas digitales en criminalística a fines del siglo XIX. En la historia podemos encontrar otros ejemplos de innovaciones técnicas, tales como la televisión a color en México o el proyecto Cybersyn en Chile (un «sistema nervioso nacional» creado a principios de los años setenta, que opaca a algunos intentos actuales de gobierno electrónico).

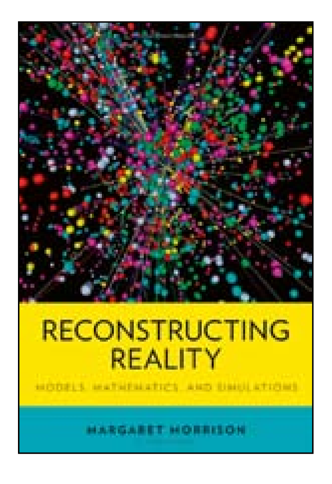
Pero la contribución de este volumen va más allá de casos anecdóticos de innovación. Muchos capítulos tratan de la adaptación de las tecnologías en la región, tales como la energía atómica, cuya adecuación requirió desarrollos locales. Otro ejemplo corresponde a la fabricación de bloques de hormigón en Cuba, importada de la Unión Soviética. Esta fue perfeccionada en la isla caribeña y las mejoras se incorporaron a la fabricación de hormigón en la URSS. Este y otros ejemplos ilustran que el flujo de ideas no es necesariamente unidireccional de los países «desarrollados» a los países «en vías de desarrollo».

Está claro que tendemos a simplificar nuestras descripciones de los sucesos históricos. Esta simplificación es necesaria, ya que no es posible incluir todos los detalles en una descripción. Sin embargo, si omitimos elementos relevantes, caemos en una sobresimplificación y, por tanto, nuestras descripciones serán inadecuadas. Las relaciones multidireccionales en el flujo de ideas cada vez se han vuelto más relevantes, debido a la creciente interconectividad en nuestras sociedades y al llamado proceso de globalización. Cada vez más, nos enfrentamos a retos globales que son atendidos por equipos internacionales [*véase el informe especial* «Estado de la ciencia global 2015», *en este mismo número*]. Si a ello agregamos la migración de las clases creativas (fuga de cerebros), es difícil mantener una visión del mundo donde podemos diferenciar tajantemente a los productores de los consumidores de ideas. En general, cada vez es menos útil una visión de «nosotros» vs. «ellos», ya que estamos tan mezclados y embebidos que no es posible estudiar las sociedades y los procesos de innovación de manera aislada. Este libro ofrece sendos ejemplos que alertan de un cambio necesario en nuestra visión del mundo, la cual tiene que ser más integradora y menos segregadora.

Los argumentos presentados pueden aplicarse no solo a la ciencia y la tecnología, sino a toda la cultura: en moda, costumbres, música, gastronomía, economía... siempre ha habido un flujo multidireccional que ha ido acelerándose en décadas recientes, por lo que no resulta adecuada una descripción unidireccional donde nuestra especie consume solamente la cultura generada en Estados Unidos y Europa. Más aún, en el resto del mundo debe de haber casos muy similares a los presentados para Latinoamérica. Esto implica que las ideas propuestas en la obra reseñada son más amplias que el contexto en el que se presentan, lo cual incrementa su valor.

Por lo anterior, este libro es recomendable no solo para los interesados en estudios sobre ciencia, tecnología y sociedad latinoamericanos. Las ideas presentadas y los argumentos son relevantes para cualquier proceso cultural a escala global.

—Carlos Gershenson
Instituto de Investigación de Matemáticas Aplicadas, México D.C.



RECONSTRUCTING REALITY. MODELS, MATHEMATICS, AND SIMULATIONS

Margaret Morrison. Oxford University Press, 2015.

Reconstrucción de la realidad

Matematización, modelización y simulación

Compete a la filosofía de la ciencia desentrañar la compleja relación entre representaciones matemáticas abstractas, los formalismos y la realidad que tratamos de comprender. A menudo, la interpretación del mundo se apoya en la modelización de procesos, que permite reconstruir el sistema sometido a investigación. De un tiempo a esta parte se ha sumado la simulación, constituida ahora en herramienta indispensable de la tarea científica. Desde el punto de vista epistemológico, el quid de la cuestión estriba en averiguar en qué medida las descripciones abstractas —pensemos en los métodos de

la teoría gauge y el grupo de renormalización— potencian nuestro conocimiento del mundo físico.

Lord Kelvin es bien conocido por su énfasis en el papel de los modelos en producir conocimiento científico. «Nunca me siento satisfecho hasta que consigo un modelo matemático del fenómeno. Si puedo construir un modelo mecánico, puedo afirmar que lo entiendo. Mientras tanto, me siento incómodo y reconozco que no lo entiendo. Creo firmemente en la teoría electromagnética de la luz; cuando entendamos el magnetismo, la electricidad y la luz, podremos contemplarlos en su conjunción, como partes de un todo.» Kelvin aludía a la formulación lagrangiana de Maxwell de la electrodinámica y a la ausencia de un modelo mecánico idóneo que describiera la propagación de las ondas electromagnéticas a través del espacio.

La naturaleza de la modelización y simulación, su estatuto epistemológico y metodológico, así como la función desempeñada en el avance de la ciencia y la filosofía, se encuentran sujetos a permanente debate. A la simulación, por ejemplo, se le asigna un papel pragmático; de los modelos, fuente independiente de razonamiento, sin copia original en que espejarse, se ha dicho que no son más que metáforas cuyo propósito estriba en traducir coherentemente una realidad compleja dada mediante una semejanza adecuada.

En *Reconstructing reality,* Margaret Morrison reflexiona sobre la relación entre modelos, simulaciones y realidad a partir de diferentes perspectivas epistemológicas y metodológicas, con el foco centrado en la física. El libro se estructura en tres partes: matemática, modelización y simulación. Cada una de ellas se ocupa de un aspecto de la reconstrucción de la realidad; en todos los casos interviene la matemática.

En *Il Saggiatore,* publicado en 1623, Galileo declaró que el libro de la naturaleza estaba escrito en el lenguaje de la matemática. Para comprender el universo, necesitamos descubrirlo correctamente. Entendía Galileo que la matemática era la base de tal descripción. Tomando su ejemplo (la distancia de la caída libre de un objeto es proporcional al cuadrado del intervalo temporal), se observa que la pauta del movimiento de caída libre puede describirse a través de la medición de un parámetro: la distancia. Puede afirmarse que la medición y el valor asignado ilustran la pauta; a saber, que la distancia varía con el cuadrado del tiempo. Con la matematización del problema especificamos de una forma precisa la relación entre distancia y tiempo.

El estudio de la relación entre matemática y realidad (entre matemática y sistema físico) se articula a través de la resolución de dos cuestiones diferentes, aunque emparentadas: primera, el modo en que la abstracción e idealización en la construcción del modelo potencia nuestra comprensión de rasgos específicos de sistemas físicos y biológicos; segunda, en qué medida la explicación matemática aporta información física. Se distingue entre abstracción (proceso en cuya virtud describimos los fenómenos de una forma irrealizable en el mundo físico; por ejemplo, una población infinita) e idealización (en la que el sistema se va acotando mediante la adición de factores de corrección; como el rozamiento en la modelización de un péndulo). La idealización se usa para facilitar el cálculo.

La abstracción matemática empleada en la modelización facilita nuestro conocimiento de una forma que le resulta inalcanzable a la investigación experimental. Atendamos, para ello, a la biología de poblaciones. Desde el desarrollo de la disciplina en la primera mitad del siglo xx, el uso de técnicas matemáticas, así las ecuaciones de difusión, posibilitó la aparición de nuevas formas de caracterizar a las poblaciones. Se abandonaban las poblaciones naturales o «reales», estudiadas por los biólogos de campo; las poblaciones eran ahora constructos matemáticos, manipulables algebraicamente. En este contexto, impera el modelo, no el sistema o entorno del mundo real (la población viva). La nueva modelización matemática señaló un punto de inflexión en la comprensión de las características genéticas de las poblaciones naturales. En la genética de poblaciones, los objetos de estudio son las frecuencias y adaptación de genotipos en las poblaciones naturales. La misma evolución vendría a ser el cambio en la frecuencia de genotipos en el transcurso del tiempo, lo que podría ser resultado de sus diferencias en su eficacia biológica. Los modelos matemáticos, centro de la investigación, incorporan supuestos idealizadores que ignoran las complejidades de las poblaciones reales; prestan atención, por ejemplo, a uno o varios *loci* (pocos) a la vez, en unas poblaciones que se aparean aleatoriamente o que tienen un patrón de migración simple.

La segunda parte del libro centra la discusión en la modelización (con detenimiento en la teoría de la superconductividad de Bardeen, Cooper y Schrieffer). Aborda tres problemas. En primer lugar, el papel de los modelos hipotéticos en la obtención de una intelección fiable de los principios subyacentes. Para Morrison, hemos de atender a la secuencia correcta del razonamiento, que procede así: de la ley al modelo y de este a la realidad; es decir, la realidad es un ejemplo de un modelo y un modelo es un ejemplo de una ley.

En segundo lugar, el significado de la exposición representativa de la que se ocupan los modelos. Hay modelos interpretativos basados en la teoría y modelos representativos basados en el mundo. Cabe preguntarse cuál de los dos aparece primero. Aunque la teoría sea necesariamente anterior a la representación, se requiere un modelo para determinar de qué modo se van a aplicar los conceptos abstractos/teoría en una situación específica. En tercer lugar, el papel de modelos inconsistentes. A este respecto, la autora defiende un realismo perspectivista; sugiere que la inconsistencia puede ayudar a explorar la realidad con una praxis inapropiada. El perspectivismo deja irresuelto el problema de la verificación y validación.

La tercera parte de la obra resalta la importancia de la simulación como técnica crucial para adquirir un conocimiento nuevo y peculiar sobre la realidad. ¿Es la simulación equivalente al experimento (en el sentido de investigaciones fundadas en materiales de laboratorio)? ¿O es acaso una herramienta apropiada para medir hechos inasibles? Si miramos a nuestro alrededor, observamos que la formación y el aprendizaje basados en la simulación tienen un amplio uso en aviación y en el ejército. En medicina, sin embargo, ya sea por escepticismo, ya sea por falta de pruebas, ha costado introducirla como herramienta de aprendizaje. Pero los estudios recientes sugieren que las especialidades quirúrgicas de alto riesgo, como las oftalmológicas, han comenzado a ver sus beneficios. El potencial para mejorar la seguridad del paciente, abreviar los procesos de aprendizaje y permitir a los discentes abordar situaciones de riesgo con seguridad ha convertido la simulación en una herramienta de aprendizaje quirúrgico. Desde un punto de vista más general, va tomando cuerpo la idea que equipara el estatuto epistémico de la simulación al de la experimentación. La simulación formaría parte integral del proceso de experimentación. [*Véase* «La naturaleza de la prueba científica en la era de las simulaciones», por Kevin Heng; Investigación y Ciencia, mayo de 2015.]

En cuanto técnica de medición, la simulación sustituye con ventaja a planteamientos experimentales más tradicionales. A la luz del importante papel desempeñado por la simulación en los experimentos recientes del Gran Colisionador de Hadrones del CERN, ha dejado de tener sentido la distinción entre simulación y experimento en ciertos contextos. Bajo determinadas circunstancias, la simulación funciona de una manera similar a la medición experimental hasta lograr que sus resultados sean epistémicamente equiparables. Un sistema de simulación consta de computador, modelo de simulación y programa.

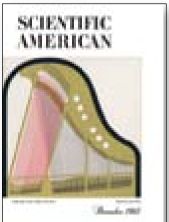
Aunque es obvio que ninguna simulación puede demostrar la existencia de la partícula de Higgs, los experimentos y el equipo diseñado para descubrir el bosón en cuestión se apoyan en gran medida en el conocimiento producido por la simulación. No resulta, pues, exagerado afirmar que solo pudo darse el descubrimiento del bosón de Higgs gracias a la simulación: el conocimiento obtenido por esta permitió saber dónde buscar un episodio de Higgs, si se produjo un episodio y si podíamos confiar en la capacidad predictiva del colisionador. La medición de la masa asociada con el descubrimiento depende, lógica y causalmente, de la simulación. En breve, el descubrimiento del bosón de Higgs constituye la validación de todos los aspectos de la simulación, pues indica que la física simulada y el detector son fiables.

Y una cuestión clave. Para entender de qué modo la matemática, por sí misma, es capaz de aportar información física genuina, fijémonos en el modelo del grupo de renormalización, técnica que aporta información sobre el comportamiento de un sistema en un punto crítico. El grupo de renormalización permite establecer invariancia de escala bajo un conjunto de transformaciones que nos permite investigar cambios en un sistema físico contemplado a diferentes escalas. Merced a este método hemos comprendido fenómenos críticos de física estadística y de teoría cuántica de campos cuya intelección parecía vedada. La primera aplicación sistemática del grupo de renormalización en teoría cuántica de campos fue realizada por Gell-Mann y Low. Con ello se mostró que la electrodinámica cuántica podía mostrar una conducta simple de escala a pequeñas distancias.

Los problemas epistémicos que se plantean con la modelización se potencian en la evaluación del estatuto de la simulación por computador. No hay que preocuparse solo de que el modelo teórico represente adecuadamente la realidad, sino de que el proceso de discretización exigido para configurar el modelo teórico apto para una solución numérica pueda entrañar cambios sustanciales en el contenido informativo del modelo original. Por consiguiente, a las preocupaciones en torno a la resolución correcta del modelo, hay que sumar la determinación de la cuantía en que la simulación represente el sistema, la realidad. Puesto que las simulaciones se hallan a menudo asociadas a los computadores, su estatuto en cuanto experimentos está ligado a la noción de experimentos numéricos, que implican el uso de métodos numéricos.

— Luis Alonso

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



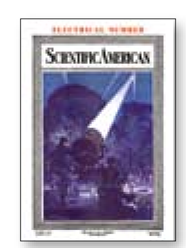
Diciembre 1965

«Intocables» de la India

«Sin violencias y sin que se note mucho desde el exterior, la India está pasando por una revolución social profunda. Sanciones religiosas, y también económicas, sociales y legales, han mantenido tradicionalmente a las castas más bajas en una situación de inferioridad. Hoy, tanto la nueva constitución del país como el Gobierno están firmemente comprometidos en la derogación de esas tradiciones. Por razones comprensibles, el mismo pueblo indio ha evitado siempre el término «intocables». La mayoría de los indios mencionan ahora a los antiguos intocables con el nombre que Mahatma Ghandi les dio: *harijans*, o "hijos de Dios". Con la nueva legislación, los *harijans* ya son libres de adoptar el estilo de vida que prefieran; todos los tabúes tradicionales están legalmente abolidos. Según la ley, pueden vestir como les plazca, beber del pozo de cualquier pueblo, entrar en todos los templos hindúes.»

Cigarrillos y aterosclerosis

«Ha quedado establecida una relación directa entre el consumo de cigarrillos y la aterosclerosis coronaria, la situación en la cual se forman depósitos de grasa en las arterias del corazón y se reduce su diámetro interno. Estudios anteriores habían demostrado que el riesgo de enfermedad coronaria y de muerte por ataque cardíaco es mayor entre los fumadores de cigarrillos que entre los no fumadores. Pero aquellos estudios nada decían acerca de las arterias de los fumadores; podrían haber indicado, simplemente, que fumar sobrecarga el corazón. Los investigadores han informado ahora que los casos de aterosclerosis entre los fumadores son mucho más numerosos que entre los no fumadores, y que aumentan con el consumo de tabaco.»



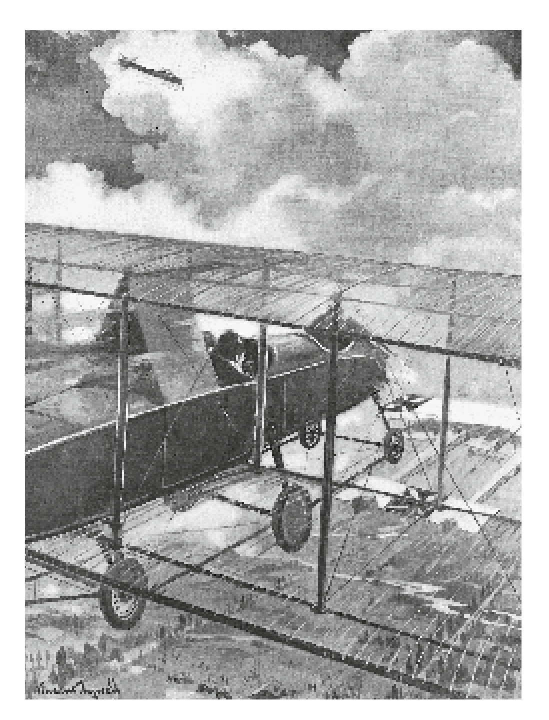
Diciembre 1915

El sueño de la invisibilidad

«Las autoridades militares esperan con gran interés el desarrollo del nuevo aeroplano francés invisible, que claramente apuesta por revolucionar la guerra aérea. El fuselaje y la estructura están hechos, como en los aparatos normales, de aluminio reforzado con alambre. Sobre la estructura se extiende, en vez de lona, un material transparente que parece un cruce de mica y celuloide (*véase la ilustración*). El compuesto, denominado "cellon", es una combinación química de celulosa y ácido acético. Casi tan transparente como el vidrio, no se agrieta ni se quiebra y posee la tenacidad y flexibilidad del caucho.»

Radio para unas cosechas sanas

«La firma que lo vende recomienda emplear el fertilizante de radio en la proporción de unos cien gramos por metro cuadrado de suelo cultivable. R. R. Ramsey estima que ello añade al suelo solo una décima parte de la cantidad que ya contiene, un buen despilfarro de dinero. Para duplicar la cantidad de emanación de radio disponible para las cosechas, los agricultores deberían hacer una siembra de dieciocho miligramos de radio por metro cuadrado, al precio de unos insignificantes 7500 dólares. Es evidente que aun el más moderno de los agricultores se conformará satisfecho con las reservas de radio que ya albergan sus tierras.»



AVIÓN TRANSPARENTE: En un temprano intento de que fuera imperceptible, el material empleado carecía de resistencia y durabilidad, 1915.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXIII, N.º 25, 18 DE DICIEMBRE DE 1915



Diciembre 1865

Dudas geotérmicas

«En la última reunión de la Sociedad Literaria y Filosófica de Manchester, el señor George Greaves leyó un comunicado que expresaba la sugerencia de que debería emplearse "el calor interno de la Tierra" en lugar de los combustibles. Considera que el calor del océano ardiente que según él se halla bajo nuestros pies podría abastecernos de cuanta energía mecánica deseáramos, y que un procedimiento para lograrlo "podría consistir en la producción directa de energía por vapor poniendo en contacto agua suministrada desde la superficie con unos estratos lo bastante calientes, mediante perforaciones artesianas u otro medio". Pero aún tiene que explicar, admitiendo la existencia de esos "estratos lo bastante calientes", de qué modo podríamos hacer unas "perforaciones artesianas" lo suficientemente profundas.»

Ciencia y meteorología

«El registro diario de observaciones meteorológicas, telegrafiado al Observatorio Imperial de París y publicado en una hoja litografiada, sigue aumentando de interés e importancia bajo la activa e ilustrada supervisión del señor Le Verrier, director del observatorio. El mapa de Europa, con la evolución de las curvas isobaras y las eólicas a lo largo del mismo día de la publicación, así como una tabla con la previsión meteorológica para el día siguiente, se siguen insertando en cada número.»

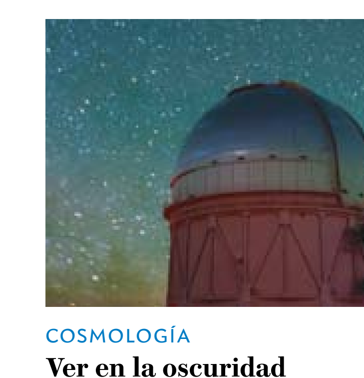
MEDICINA

Detección más rápida de infecciones

Shana O. Kelley

Nuevos nanosensores capaces de diagnosticar enfermedades infecciosas en tan solo veinte minutos podrían salvar muchas vidas.





COSMOLOGÍA

Ver en la oscuridad

Joshua Frieman

El ambicioso Sondeo de la Energía Oscura se propone descubrir por qué el espacio se está expandiendo cada vez más rápido.

CRIPTOGRAFÍA

Los límites físicos de la privacidad

Artur Ekert y Renato Renner

Desarrollos recientes en el campo de la criptografía cuántica demuestran que la privacidad es posible bajo condiciones asombrosamente débiles.



ARQUEOLOGÍA

El efecto pirámide

Zach Zorich

La construcción del monumento más famoso de Egipto dio origen a una organización social que cambió el mundo.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Robin Lloyd
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Voss

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes, Gran ciencia, grandes retos, ¿Cuán grande es la gran ciencia?, Ciencia para reducir el crimen y Difícil, pero no imposible*; Andrés Martínez: *Apuntes y Las funciones vitales del sueño*; Marián Beltrán: *Las dificultades del Proyecto Cerebro Humano y Evaluación científica de los programas contra la pobreza*; José Óscar Hernández Sendín: *Efectos del dopaje en una superred*; Xavier Roqué: *Tomar el pulso a la luz*; Fabio Teixidó: *El océano caliente de Encélado*; Julio Samsó: *Las estrellas de los difuntos*; Juan Pedro Adrados: *Sorpresas en los cinturones de Van Allen*; Alfonso Susanna: *Ayudar a los bosques a adaptarse al cambio climático*; Pedro Castiñeiras: *Geomorfología experimental*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3
08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España